



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

**VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DI DIVERSI
ADDITIVI COMMERCIALI SULLE PROPRIETÀ
FISICO-MECCANICHE DI CALCESTRUZZI LC3**

Evaluation of the effectiveness of different commercial additives on the physico-mechanical properties of LC3 concretes

Relatore:

Prof. Jacopo Donnini

Correlatori:

Ing. Alessandra Mobili

Dott. Emanuele Caioni

Tesi di Laurea di:

Alessandro Moriconi

A.A. 2025/2026

SOMMARIO

1	INTRODUZIONE	6
1.1	IMPATTO AMBIENTALE DELL'INDUSTRIA DEL CEMENTO	6
1.2	IL CONSUMO DI CEMENTO A LIVELLO GLOBALE.....	6
1.3	IL CONSUMO DI CEMENTO IN ITALIA.....	9
2	I COMPONENTI DEL CEMENTO.....	11
2.1	IL CALCARE	11
2.2	LA MARNA.....	11
2.3	COMPONENTI CORRETTIVI.....	11
3	IL CICLO PRODUTTIVO DEL CEMENTO	13
3.1	LA FRANTUMAZIONE	13
3.2	LA COTTURA.....	13
3.3	LA TORRE A CICLONI.....	14
3.4	IL FORNO ROTANTE	15
3.5	RAFFREDDAMENTO DEL CLINKER.....	16
3.6	MACINAZIONE DEL CLINKER.....	16
4	I COMPONENTI DEL LEGANTE LC3.....	18
4.1	CEMENTO CLINKER	18
4.2	ARGILLA CALCINATA	18
4.3	CALCARE E GESSO	18
5	SOSTENIBILITÀ E NORMATIVE (ITALIA-EUROPA)	19
5.1	DEFINIZIONE DI SOSTENIBILITÀ.....	19
5.2	IL QUADRO NORMATIVO ITALIANO	21
5.3	I NUOVI CEMENTI.....	23
6	MATERIALI UTILIZZATI	27
6.1	INERTE.....	27
6.1.1	LA SABBIA.....	28
6.1.2	IL FILLER CALCAREO.....	28
6.2	ACQUA	29
6.2.1	SUPERFLUIDIFICANTE	29
6.3	LEGANTE	30
6.3.1	CEMENTO PORTLAND	30
6.4	ARGILLA	31
7	PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DELLE SABBIE	32

7.1	CALCOLO DELL'UMIDITÀ u% DELLA SABBIA.....	32
7.1.1	ESECUZIONE DELLA PROVA	32
7.2	PROVA DEL CASTELLETTO.....	33
7.3	GRANULOMETRIA	35
8	OTTIMIZZAZIONE DEL DOSAGGIO DEGLI ADDITIVI SUPERFLUIDIFICANTI	38
8.1	MINI SLUMP TEST SU PASTA CEMENTIZIA	38
8.1.1	MINI SLUMP TEST: LC3.....	38
8.1.2	MINI SLUMP TEST: OPC	41
8.2	PROVA DI CONSISTENZA ALLO STATO FRESCO	44
8.2.1	PROVA DI LAVORABILITÀ: OPC	46
8.2.2	PROVA DI LAVORABILITÀ: LC3	55
9	TEST DELLA RITENZIONE DELLA LAVORABILITÀ AL VARIARE DELLA TEMPERATURA AMBIENTALE	61
9.1	MIX DESIGN DELLE MISCELE PER UNITÀ DI VOLUME (1 LITRO)	61
9.2	PROVE DI LAVORABILITÀ: CEMENTO PORTLAND	72
9.3	PROVE DI LAVORABILITÀ: LC3	79
9.4	CONSIDERAZIONI FINALI DELLA PROVA	85
9.4.1	OPC:	85
9.4.2	LC3:	86
10	PROPRIETÀ MECCANICHE	87
10.1.1	PROVA DI RESISTENZA A FLESSIONE	89
10.1.2	PROVA DI COMPRESSIONE.....	90
10.2	PROVE DI RESISTENZA A FLESSIONE: OPC	91
10.3	PROVE DI RESISTENZA A FLESSIONE: LC3	94
10.4	CONSIDERAZIONI FINALI DELLE PROVE DI FLESSIONE.....	97
10.4.1	OPC: 5°C.....	97
10.4.2	OPC: 20°C.....	97
10.4.3	OPC: 40°C.....	97
10.4.4	LC3: 5°C	97
10.4.5	LC3: 20°C	98
10.4.6	LC3: 40°C	98
10.5	PROVE DI RESISTENZA A COMPRESSIONE: OPC	99
10.6	CONSIDERAZIONI FINALI DELLE PROVE DI COMPRESSIONE.....	108
11	CONCLUSIONI	110
	BIBLIOGRAFIA	111

1 INTRODUZIONE

1.1 IMPATTO AMBIENTALE DELL'INDUSTRIA DEL CEMENTO

Negli ultimi anni, il tema della **sostenibilità ambientale** ha assunto una rilevanza centrale nel dibattito scientifico e industriale.

Il settore delle costruzioni rappresenta uno dei comparti a maggiore impatto: l'industria edilizia, infatti, oltre a determinare un elevato **consumo di suolo**, è responsabile dell'immissione in atmosfera di ingenti quantità di anidride carbonica e altri agenti inquinanti.

Tale impatto si manifesta sia indirettamente, attraverso l'impiego di materiali prodotti mediante processi termici ad alta intensità energetica, sia direttamente durante la fase di esercizio degli edifici.

Grazie ai progressi della ricerca, sono stati sviluppati o riscoperti materiali caratterizzati da un **bilancio energetico** decisamente più favorevole rispetto a quelli tradizionali.

Molte di queste soluzioni sono già disponibili sul mercato e mostrano una crescente competitività anche in termini economici.

Tuttavia, la sostituzione integrale dei materiali convenzionali non è sempre agevole, in particolare nel contesto delle grandi opere infrastrutturali (ponti, gallerie, edifici di grandi dimensioni) dove sono richiesti standard di **prestazione meccanica** estremamente elevati, storicamente garantiti dal cemento Portland.

Alla luce dei nuovi paradigmi dell'architettura e dell'ingegneria sostenibile, appare dunque necessario orientare la ricerca verso l'ottimizzazione dei materiali da costruzione tradizionali in chiave ecologica.

In questo scenario si inseriscono i **cementi LC3** (Limestone Calcined Clay Cements), recepiti dalla normativa **UNI EN 197-5:2021**.

Tali miscele prevedono la parziale sostituzione del clinker Portland con una combinazione di argilla calcinata, calcare e gesso.

Questo approccio permette di mantenere elevate prestazioni meccaniche e durabilità garantendo, al contempo, una riduzione delle emissioni di CO₂ stimata fino al 40% rispetto ai cementi tradizionali.

1.2 IL CONSUMO DI CEMENTO A LIVELLO GLOBALE

Secondo quanto riportato dal *World Business Council for Sustainable Development*, il calcestruzzo rappresenta la risorsa più utilizzata al mondo dopo l'acqua.

I dati recenti evidenziano una tendenza critica: rispetto ai livelli del 2020, il consumo energetico nel settore delle costruzioni è aumentato del 5%, anche le relative emissioni di CO₂ sono cresciute del 5%, raggiungendo la quota di circa 10 Gt.

La superficie edificata a livello globale ha continuato a registrare un trend di crescita, segnando un incremento di circa l'1% su base annua.

In termini assoluti, lo stock edilizio mondiale ha ormai superato la soglia dei **240-250 miliardi di metri quadrati**. Proiettando l'attuale andamento demografico e di urbanizzazione, si stima che entro

il 2030 sarà necessario realizzare circa **230 milioni di metri quadrati aggiuntivi** ogni anno, con una concentrazione maggiore nelle economie emergenti.

Questo scenario di espansione infrastrutturale esaspera la criticità delle emissioni di **carbonio incorporato** (*embodied carbon*), ovvero la quota di inquinanti generata durante l'intero ciclo di vita dei materiali, con una particolare incidenza nelle fasi di estrazione delle materie prime e produzione dei leganti cementizi.

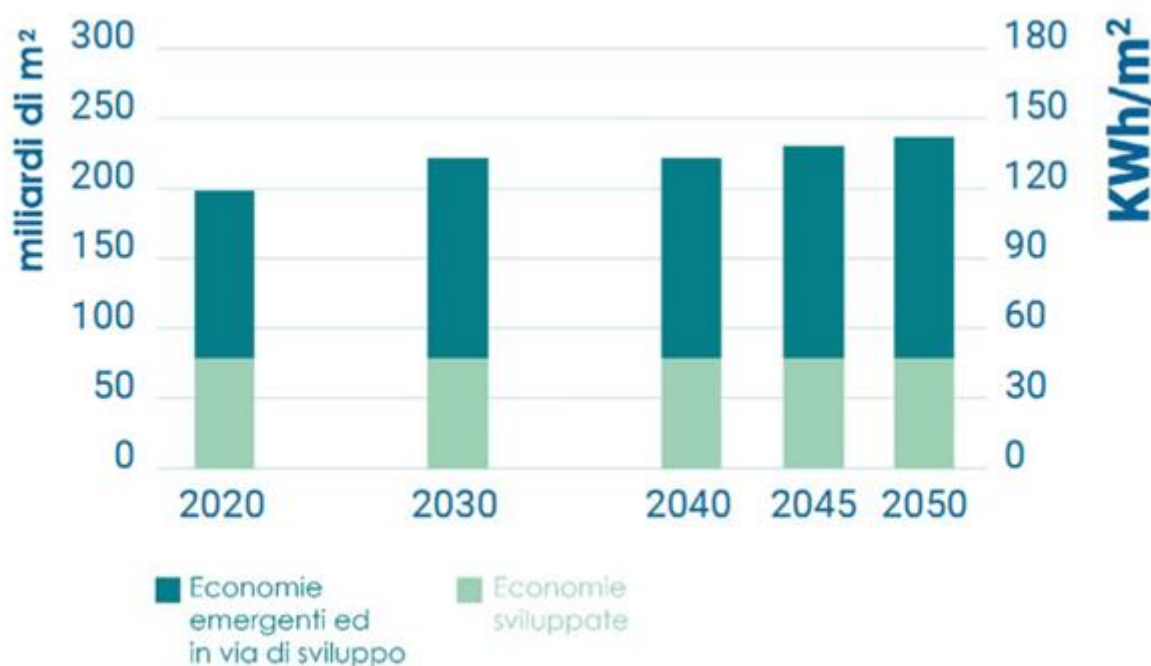


Figura 1: Proiezione della crescita annua della superficie edificata globale (miliardi di m²).

Fonte: United Nations, Global Status Report for Buildings and Construction

L'espansione costante del settore delle costruzioni su scala globale determina un incremento speculare nella domanda di materie prime.

Come evidenziato nella **Figura 1**, la serie storica mostra una significativa flessione in corrispondenza dell'anno 2020: tale **contrazione del mercato**, rappresentata graficamente dal brusco cambio di pendenza, è riconducibile alla sospensione delle attività di cantiere e alla crisi della catena di approvvigionamento causata dalla pandemia da COVID-19.

Tuttavia, la tendenza successiva evidenzia una rapida ripresa, confermando la resilienza del comparto e la persistente necessità di reperire risorse per soddisfare i fabbisogni edilizi mondiali.

Questa forte ripresa visibile in tutti gli stati analizzati dunque, non va vista in chiave forzatamente negativa, poiché conferma in ogni caso la ripresa del mercato, che deve comunque mirare ad una progettazione consapevole.

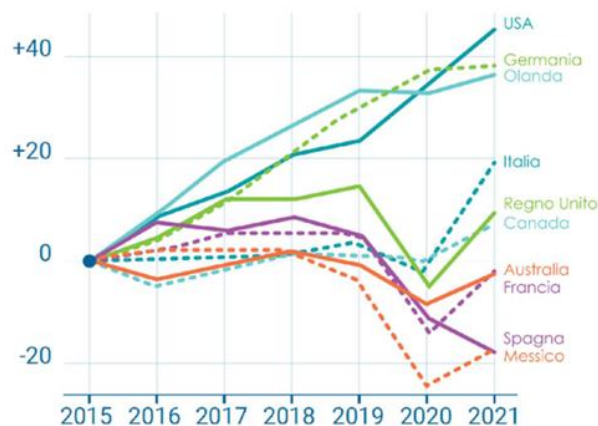


Figura 2: incremento in % dell'attività di costruzione degli edifici rispetto al 2015

Fonte: World Business Council for Sustainable Development, Toward a Sustainable Cement Industry

Nel biennio 2019-2020, la domanda di **energia operativa** (*operational energy*) negli edifici ha registrato un incremento significativo.

Tale fenomeno è riconducibile alle misure di restrizione e ai periodi di quarantena imposti su scala globale, che hanno determinato un uso più intensivo e prolungato degli spazi residenziali. Parallelamente, nonostante le fluttuazioni del mercato, il dispendio energetico legato alla produzione di materiali primari quali **cemento, acciaio e alluminio** ha continuato a crescere, arrivando a rappresentare il 4% della domanda energetica complessiva dell'industria.

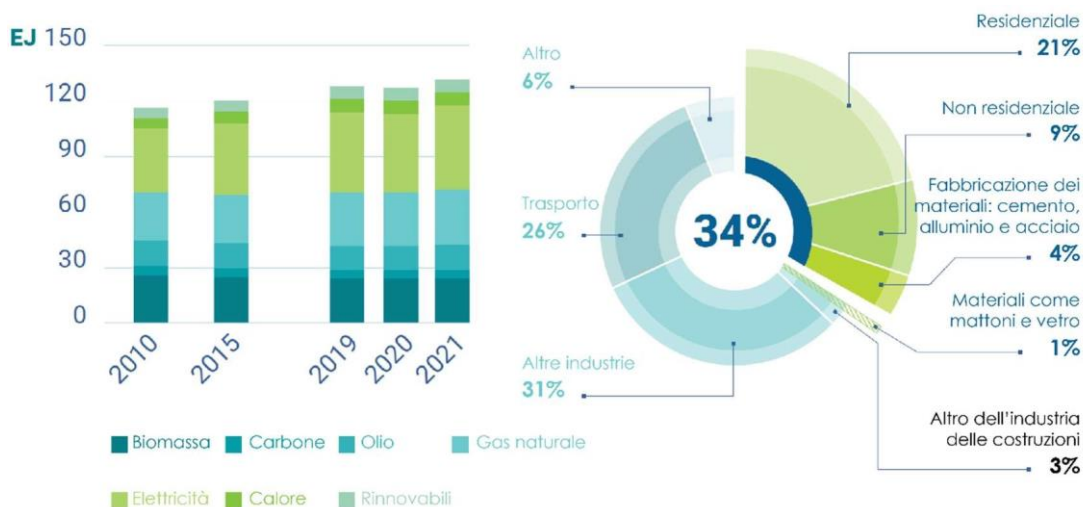


Figura 3: Richiesta annua in termini prestazionali dell'energia richiesta per diversi settori

Fonte: United Nations, Global Status Report for Buildings and Construction

Le emissioni di CO₂ associate al comparto edilizio — comprensive sia della quota **operativa** legata all'esercizio degli edifici, sia della quota **incorporata** derivante dalla produzione dei materiali da costruzione — hanno registrato un incremento rispetto ai livelli del 2020. Attualmente, l'industria delle costruzioni è responsabile del **37% delle emissioni globali** di anidride carbonica, una stima che integra l'intero ciclo di vita dell'opera, dalla sintesi dei componenti alla fase di utilizzo.

In questo contesto, l'obiettivo del presente lavoro di tesi non risiede nella rifunzionalizzazione degli spazi o nella modifica delle abitudini d'uso delle strutture, bensì nell'**ottimizzazione sostenibile dei materiali**. La ricerca si focalizza sullo sviluppo di una miscela cementizia capace di garantire

prestazioni meccaniche equivalenti ai materiali tradizionali, riducendo tuttavia in modo significativo l'impronta di carbonio complessiva.

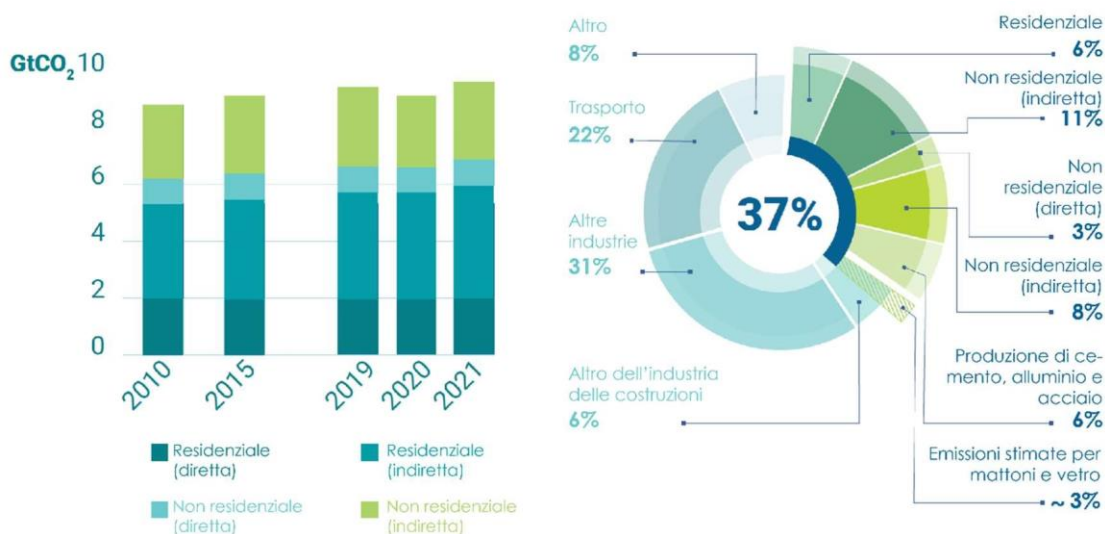


Figura 4: Emissioni totali annue di CO₂ espresse in Gt

Fonte: United Nations, Global Status Report for Buildings and Construction

La sola produzione di clinker di Portland comporta l'emissione di circa **600 kg di CO₂ per tonnellata di prodotto finito**. Alla luce di tale impatto, risulta indispensabile adottare **interventi strutturali e strategie di mitigazione** nel processo produttivo, al fine di allineare il settore cementizio agli obiettivi di decarbonizzazione stabiliti dall'**Accordo di Parigi del 2015**. Il raggiungimento di tali traguardi climatici richiede necessariamente una transizione verso leganti alternativi a bassa impronta di carbonio.

1.3 IL CONSUMO DI CEMENTO IN ITALIA

Sotto il profilo produttivo, l'Italia ricopre storicamente un ruolo di primo piano nel panorama internazionale: nel 2016 si è posizionata tra i primi quattro produttori di calcestruzzo in ambito europeo e tra i primi venti a livello globale, con un volume di circa **30 milioni di metri cubi**.

Relativamente all'impatto ambientale, analisi di settore riferite al periodo 2017-2018 evidenziano una tendenza critica, con un incremento delle emissioni di CO₂ del **3,2%**. Tale dato risulta particolarmente significativo se rapportato al contesto continentale, in quanto la quota emissiva nazionale ha superato il **10% delle emissioni totali europee** legate al comparto.

L'andamento riportato nella **Figura 2** conferma la costante espansione del settore delle costruzioni su scala internazionale. Focalizzando l'analisi sul contesto italiano, si osserva nel periodo post-2020 un incremento del **23% delle attività edilizie**. Tale scenario evidenzia l'urgenza di adottare strategie di mitigazione strutturali, orientate sia all'ottimizzazione dell'impiego delle risorse naturali, sia alla riduzione dell'intensità energetica dei processi produttivi, con particolare riferimento all'abbattimento del consumo di combustibili fossili.

Al fine di perseguire la decarbonizzazione del settore edilizio, le strategie volte alla mitigazione delle emissioni di CO₂ possono essere sintetizzate in tre approcci principali:

- **Ottimizzazione del mix design:** riduzione del fattore di clinker attraverso la parziale sostituzione del Cemento Portland con materiali cementizi supplementari (SCMs);
- **Innovazione chimica dei leganti:** impiego di costituenti a bassa impronta di carbonio o tecnologie *carbon-neutral*, finalizzate all'abbattimento delle emissioni durante le fasi di sintesi e di idratazione;
- **Efficienza strutturale:** impiego di calcestruzzi ad alte prestazioni (\$HPC\$) che, grazie alle superiori proprietà meccaniche, consentano una riduzione volumetrica degli elementi strutturali e, conseguentemente, una minore incidenza di armatura metallica.

Il presente lavoro di tesi si focalizza sul primo degli obiettivi citati. Nello specifico, verranno analizzati leganti cementizi innovativi caratterizzati da un ridotto contenuto di clinker, con l'obiettivo di verificare il mantenimento di prestazioni meccaniche analoghe a quelle delle miscele convenzionali.

2 I COMPONENTI DEL CEMENTO

Il cemento Portland è costituito da un complesso equilibrio di ossidi, principalmente **ossido di calcio (CaO)**, **biossido di silicio (SiO₂)**, **allumina (Al₂O₃)** e **ossido di ferro (Fe₂O₃)**. Poiché è raro che tali costituenti siano presenti nelle proporzioni stechiometriche ottimali all'interno di un'unica materia prima, risulta necessario procedere alla formulazione di una **miscela cruda** (*raw meal*).

Quest'ultima viene ottenuta combinando opportunamente un **componente calcareo**, caratterizzato da un elevato tenore di carbonato di calcio, con un **componente argilloso**, che funge da apportatore delle frazioni necessarie di silice, allumina e ossidi di ferro.

I componenti principali del cemento sono dunque il calcare e l'argilla, oppure il calcare e la marna.

2.1 IL CALCARE

Il **carbonato di calcio (CaCO₃)** è un minerale di origine sedimentaria molto comune che si può formare per mezzo di due processi:

- Precipitazione diretta dell'acqua, solitamente di mare
- Accumulo in un lungo periodo temporale di innumerevoli scheletri di animali microscopici.

Le forme più pure di calcare sono lo spato calcare (calcite), l'aragonite ed il marmo. La sua durezza dipende dall'era geologica: più è antica la formazione geologica, più duro risulta il calcare.

Normalmente il calcare contiene miscele di sostanze argillose che ne influenzano il colore.

2.2 LA MARNA

I calcari caratterizzati da frazioni significative di silice, argilla e ossidi di ferro vengono definiti **marne**. Grazie alla loro ampia disponibilità naturale, queste rocce rappresentano una materia prima d'elezione per l'industria del cemento.

Dal punto di vista geologico, le marne sono **rocce sedimentarie di tipo clastico-organogeno**, derivanti dalla deposizione simultanea di frazioni argillose e carbonato di calcio (CaCO₃).

Le proprietà meccaniche di una marna sono strettamente correlate al suo **tenore argilloso**: all'aumentare della frazione pelitica, si osserva generalmente una riduzione della resistenza e della coerenza della roccia.

Anche l'aspetto cromatico è influenzato dalla componente argillosa e dalla presenza di impurità, con colorazioni che variano tipicamente dal giallo ocra (in presenza di ossidi di ferro) al grigio antracite o nero (in presenza di sostanze organiche o solfuri).

2.3 COMPONENTI CORRETTIVI

Qualora la composizione delle materie prime principali non soddisfi i parametri chimici richiesti, si rende necessario l'impiego di **materie prime correttive** per il bilanciamento stechiometrico della miscela.

Nello specifico, per incrementare il modulo silicico si utilizza comunemente la **sabbia** come apportatore di silice (SiO_2).

Per compensare, invece, un'eventuale carenza di ossidi di ferro, è possibile ricorrere a minerali di ferro naturali (come l'ematite o la magnetite) o, in un'ottica di **economia circolare**, a sottoprodotti industriali quali le **scaglie di laminazione** derivanti dai processi di lavorazione siderurgica.

3 IL CICLO PRODUTTIVO DEL CEMENTO

Gli ingredienti sopra riportati vengono quindi macinati, cotti ad alta temperatura ed addizionati con il gesso che ha la funzione di ritardante di presa.

Il materiale che si ottiene alla fine di questo procedimento è denominato cemento di Portland.

Analizziamo nel dettaglio le tre fasi del ciclo produttivo del cemento:

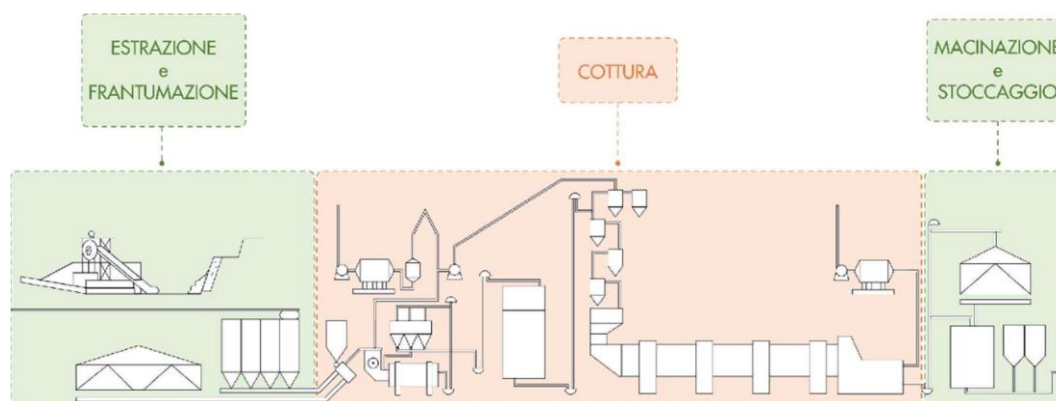


Figura 5: Schematizzazione del ciclo produttivo del cemento

Fonte: Elaborazione dell'autore tramite IA generativa

3.1 LA FRANTUMAZIONE

Al fine di ottimizzare le operazioni di movimentazione e stoccaggio, le materie prime provenienti dalle attività estrattive devono essere sottoposte a una significativa riduzione volumetrica. Tale processo avviene mediante l'impiego di **impianti di frantumazione** (frantoi a mascelle, a urto o rotativi), che consentono di ottenere una **pezzatura omogenea** compresa tipicamente tra i 5 e i 10 cm.

La frantumazione si realizza sottoponendo i blocchi lapidei a sollecitazioni meccaniche di **compressione, impatto, attrito o taglio**, a seconda della tipologia di macchinario e delle caratteristiche del materiale trattato. Si stima che questa fase preparatoria, a causa dell'elevato fabbisogno energetico dei macchinari e della logistica interna alla cava, sia responsabile di circa l'**8% delle emissioni complessive** di inquinanti associate all'intero ciclo produttivo del cemento.

3.2 LA COTTURA

L'impianto di cottura è costituito da tre parti, che lavorano una in seguito all'altra: torre a cicloni, forno rotante e raffreddatore a griglia

3.3 LA TORRE A CICLONI

Ciascun ciclone costituisce uno stadio della torre di preriscaldamento, collegato alla condotta dei gas in uscita dal forno rotante. All'interno di questo sistema, la **farina cruda** viene riscaldata per sospensione attraverso uno **scambio termico in controcorrente** con i gas caldi ascendenti. Successivamente, tramite il condotto di scarico (tubo di caduta), il materiale passa allo stadio inferiore fino all'immissione nel forno.

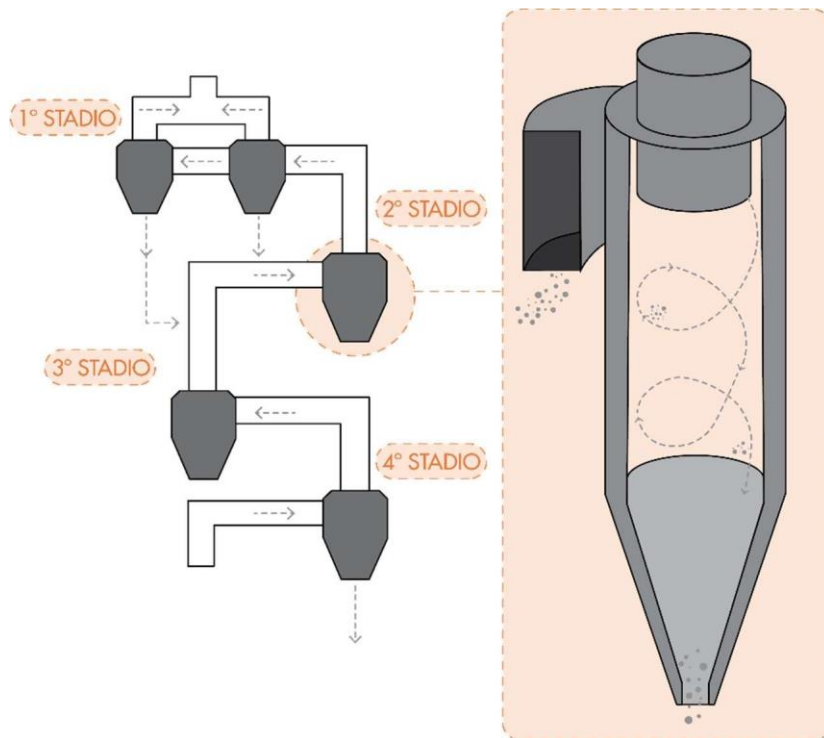


Figura 6: Schematizzazione del funzionamento della torre a cicloni
Fonte: Elaborazione dell'autore tramite IA generativa

La torre a cicloni svolge la funzione di preriscaldatore del sistema; è in questa fase che ha inizio il processo di **decarbonatazione** della farina cruda. Tale reazione chimica, nota anche come calcinazione, permette la dissociazione termica dei carbonati presenti nelle materie prime (principalmente il carbonato di calcio, CaCO_3). Il processo determina la separazione dell'anidride carbonica gassosa (CO_2) dagli ossidi solidi, i quali costituiscono i reagenti fondamentali per la successiva sintesi delle fasi mineralogiche del clinker all'interno del forno rotante.

3.4 IL FORNO ROTANTE

Il **forno rotante** presiede alla sintesi del clinker attraverso il trattamento termico della miscela cruda. La clinkerizzazione avviene esclusivamente al raggiungimento di temperature del materiale pari a circa **1450 °C**, ottenute mediante una temperatura di fiamma che può sfiorare i **2000 °C**.

Tale processo richiede un **elevato fabbisogno energetico**, rendendo questa fase la più critica dell'intero ciclo produttivo, sia in termini di consumo di combustibili fossili che di emissioni climalteranti complessive.

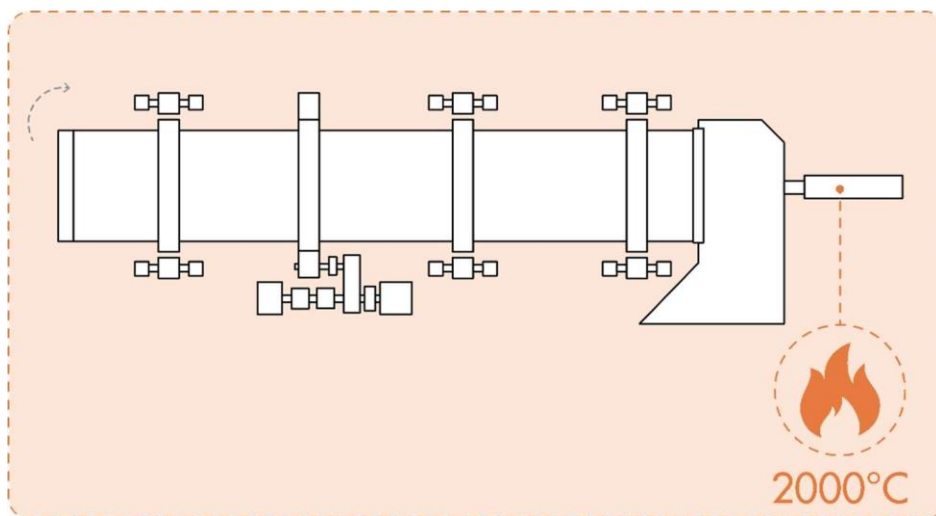


Figura 7: Schematizzazione del funzionamento del forno rotante

Fonte: Elaborazione dell'autore tramite IA generativa

All'interno del forno rotante avvengono le trasformazioni chimico-fisiche fondamentali per la sintesi del prodotto. Il processo può essere suddiviso nelle seguenti fasi principali:

- **Evaporazione:** espulsione dell'acqua residua e dell'umidità igroscopica presente nella farina cruda;
- **Decarbonatazione (Calcinazione):** dissociazione termica dei carbonati
- **Clinkerizzazione:** combinazione della calce libera con i costituenti argillosi. In questa fase si assiste alla formazione delle quattro fasi mineralogiche principali del clinker:
 - **Alite** (Silicato tricalcico, C_3S)
 - **Belite** (Silicato dicalcico, C_2S)

- **Celite** (Alluminato tricalcico, C_3A)
- **Fase ferrica** (Allumino-ferrito tetracalcico, C_4AF).

La sintesi del clinker rappresenta lo stadio a più alto impatto ambientale dell'intero ciclo produttivo. L'impronta di carbonio è determinata da due contributi distinti:

1. **Emissioni di processo:** derivanti direttamente dalla reazione chimica di decarbonatazione delle rocce calcaree (circa il 62% del totale);
2. **Emissioni di combustione:** necessarie per raggiungere le elevate temperature di regime (circa il 38% del totale).

Si stima che il fattore di emissione medio sia pari a circa **0,84 t di CO₂ per tonnellata di clinker** prodotto. Tale valore assume una rilevanza critica se rapportato ai volumi produttivi del comparto edilizio globale, rendendo necessaria la ricerca di leganti alternativi a minor contenuto di clinker.

3.5 RAFFREDDAMENTO DEL CLINKER

All'uscita dal forno rotante, il clinker deve essere sottoposto a un processo di **tempra termica** (raffreddamento rapido) per preservare lo stato di equilibrio termodinamico raggiunto ad alta temperatura e stabilizzare le fasi mineralogiche sintetizzate.

La cinetica di questo processo è cruciale: un raffreddamento repentino impedisce la trasformazione dell'**alite** (C_3S) in forme polimorfiche meno reattive e limita la crescita eccessiva dei cristalli.

Tale fase condiziona drasticamente la **microstruttura cristallina**, la distribuzione delle fasi interstiziali, la **macinabilità** del prodotto finito e, in ultima analisi, le proprietà idrauliche e le resistenze meccaniche del cemento.

3.6 MACINAZIONE DEL CLINKER

Il clinker viene trasformato in cemento vero e dopo solo una volta viene macinato.

È in questa fase che possono essere aggiunti alla miscela anche altri materiali, come additivi o regolatori di presa come il gesso. Nel molino del cotto viene amalgamata una miscela opportunamente dosata di clinker e gesso.

Una volta macinato il materiale viene stoccato in attesa di essere trasportato nel luogo del getto.

Per quanto riguarda le emissioni, la cottura sicuramente è la fase più inquinante:

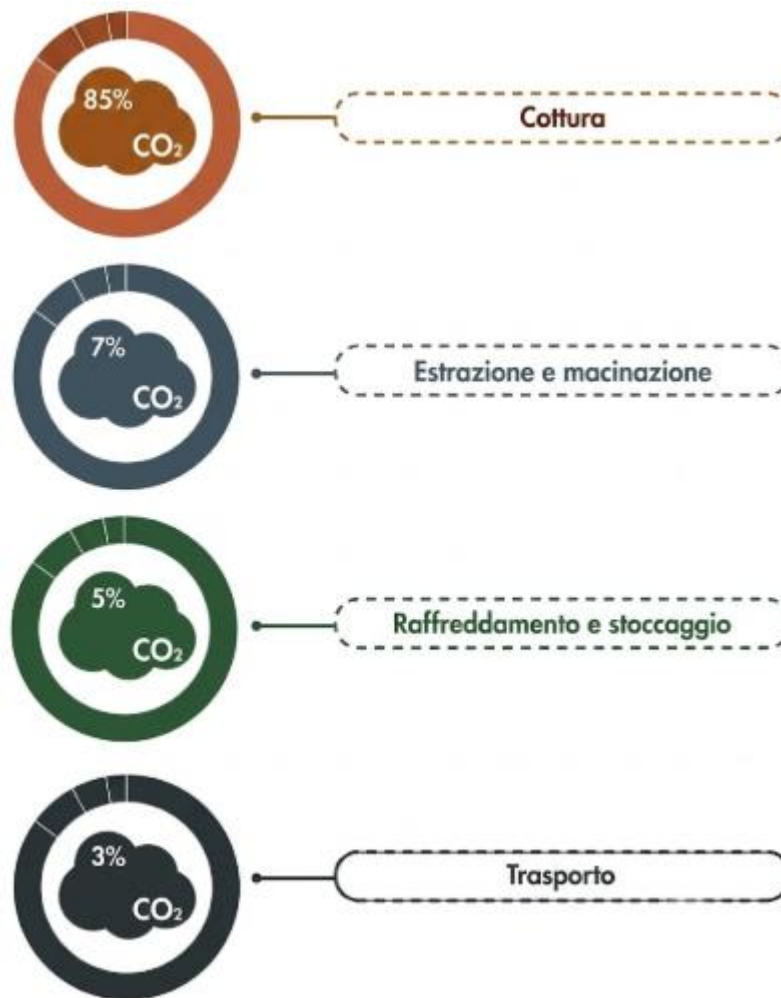


Figura 8: Percentuali di emissioni di CO₂ delle singole fasi del ciclo di produzione del cemento

Fonte: Elaborazione dell'autore tramite IA generativa

La sola cottura immette in ambiente l'85% dell'anidride carbonica dell'intero ciclo di produzione del cemento.

Per questa ragione si è rivelato necessario optare per l'utilizzo nuovi materiali, che prevedano l'impiego del minor quantitativo possibile di cemento.

Si stima infatti che per tonnellata di clinker vengano rilasciate in atmosfera 0,84 tonnellate di CO₂, di cui il 62% derivante dalla decarbonatazione delle rocce calcaree utilizzate come materia prima ed il 38% dai fumi di combustione.

4 I COMPONENTI DEL LEGANTE LC3

Il **legante LC3 (Limestone Calcined Clay Cement)** è un cemento innovativo progettato per ridurre l'impronta di carbonio rispetto al cemento Portland tradizionale.

I suoi componenti principali sono tre e vengono miscelati nelle seguenti proporzioni:

4.1 CEMENTO CLINKER

La formulazione prevede l'impiego di una frazione di **clinker di Portland** pari al **50% della massa totale** del legante (in realtà la sostituzione del cemento Portland al 50% è una possibilità, ma si può anche andare oltre a seconda delle prestazioni che si vogliono andare a raggiungere).

Sebbene il clinker costituisca la fase idraulica principale e la base reattiva della miscela, il suo dosaggio risulta significativamente ridotto rispetto alle percentuali del **90-95%** tipicamente riscontrabili nel cemento Portland ordinario (CEM I).

Tale contrazione del fattore di clinker rappresenta la strategia fondamentale per l'abbattimento delle emissioni di CO₂ associate alla produzione del materiale.

4.2 ARGILLA CALCINATA

Il secondo costituente fondamentale è l'**argilla calcinata**, introdotta nella miscela in una proporzione pari al **30% in peso del legante totale**.

Tale componente pozzolanico è ottenuto mediante l'**attivazione termica** di argille, con una preferenza per quelle ad alto contenuto di **caolinite**, sottoposte a un processo di calcinazione a temperature controllate tra **700 °C e 800 °C**.

Questo trattamento induce la deidrossilazione dei minerali argillosi, trasformandoli in una fase amorfa disordinata (metacaolino) capace di reagire chimicamente con i prodotti della stimolazione alcalina e l'idrossido di calcio derivante dall'idratazione del clinker.

4.3 CALCARE E GESSO

Il mix design è completato dall'aggiunta di **calcare (15% in peso)** e **gesso (5% in peso)**.

Il calcare, introdotto sotto forma di pietra calcarea finemente macinata, non subisce alcun trattamento termico; a differenza del processo di sintesi del clinker, la sua integrazione 'a freddo' permette di evitare totalmente le emissioni di CO₂ derivanti dalla decarbonatazione del materiale.

Parallelamente, il gesso (solfato di calcio biidrato) funge da **regolatore dei tempi di presa**, garantendo una corretta cinetica di idratazione dei silicati e degli alluminati, in modo analogo a quanto avviene nella produzione dei cementi Portland convenzionali.

5 SOSTENIBILITÀ E NORMATIVE (ITALIA-EUROPA)

5.1 DEFINIZIONE DI SOSTENIBILITÀ

L'impiego della locuzione '**materiale sostenibile**', qualora riferita esclusivamente alla dimensione ecologica, risulta analiticamente riduttivo. Nel dibattito tecnico-scientifico contemporaneo, è infatti indispensabile adottare un approccio olistico al concetto di **sostenibilità**.

Quest'ultimo, specialmente se applicato allo studio e allo sviluppo di materiali innovativi, non può prescindere da un'integrazione tra i requisiti di tutela ambientale e i criteri di fattibilità economica e progresso sociale, definendo così un quadro valutativo più rigoroso e multidisciplinare.

Il concetto di sostenibilità si articola in tre dimensioni strettamente interdipendenti, la cui integrazione è fondamentale per uno sviluppo equilibrato:

- **Sostenibilità ambientale:** intesa come la capacità di preservare il capitale naturale, garantendo la tutela della biodiversità, la rigenerazione delle risorse e l'integrità degli ecosistemi nel lungo periodo;
- **Sostenibilità economica:** definita come l'attitudine di un sistema a generare una crescita duratura, garantendo l'efficienza dei mercati e la creazione di valore e occupazione per il sostentamento della collettività;
- **Sostenibilità sociale:** riferita alla capacità di assicurare standard di benessere umano — inclusi salute, sicurezza, istruzione e giustizia — equamente ripartiti, promuovendo l'inclusione e il rispetto dei diritti fondamentali senza distinzioni di genere o classe sociale.

Risulta, pertanto, metodologicamente incompleto definire la sostenibilità di un materiale in modo **olistico** senza una profonda analisi dei processi che ne sottendono la qualificazione.

È fondamentale considerare come un materiale eccellente sotto il profilo della **compatibilità ambientale** possa rivelarsi critico se valutato attraverso parametri di **sostenibilità economica**. Tale dicotomia impone una valutazione integrata, capace di bilanciare le performance ecologiche con la fattibilità industriale e l'accessibilità del mercato.

Secondo l'**Enciclopedia Treccani**, *“la sostenibilità è la condizione di sviluppo sociale ed economico in grado di assicurare il soddisfacimento dei bisogni della generazione presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di realizzare i propri”*.

Questa definizione è in realtà fortemente influenzata dal **Rapporto Brundtland**, pubblicato nel 1987. È proprio in questo documento, che prende ufficialmente il nome di *“Our Common Future”*, che troviamo la definizione di sviluppo sostenibile, dalla quale è stata poi estrapolata la frase sopra riportata *“Lo sviluppo sostenibile è quello sviluppo che consente alla generazione presente di soddisfare i propri bisogni senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri”*.



Figura 9: Schema rappresentativo delle componenti dello sviluppo sostenibile
Fonte: Elaborazione dell'autore tramite IA generativa

La gestione razionale delle risorse naturali rappresenta il paradigma cardine dello sviluppo sostenibile, trasversale a ogni ambito applicativo.

Nel settore delle costruzioni, la sostenibilità deve permeare l'intero **ciclo di vita (Life Cycle)** dell'opera, assumendo una rilevanza cruciale nella fase di **selezione dei materiali**.

Questi ultimi devono garantire un equilibrio ottimale tra elevate prestazioni meccaniche, durabilità strutturale e comfort abitativo.

Risulta pertanto fondamentale una transizione verso modelli operativi che integrino la sostenibilità in ogni fase, dalla progettazione alla dismissione finale.

L'obiettivo primario risiede nell'**efficientamento delle materie prime** e nell'adozione di approcci di economia circolare, capaci di conciliare l'espansione dell'industria edilizia con la tutela degli ecosistemi e la salvaguardia delle risorse per le generazioni future.

Il rapporto Brundtland prevedeva la tutela dell'ambiente tramite la sensibilizzazione della collettività a comportamenti più responsabili nei confronti delle risorse utilizzate.

A partire da questa pubblicazione, iniziò a livello mondiale il ciclo di conferenze e congressi che vedranno come protagonista il tema della conservazione del pianeta per le generazioni future.

5.2 IL QUADRO NORMATIVO ITALIANO

A partire dal primo decennio degli anni Duemila, l'Unione Europea ha operato per integrare in un quadro d'azione unitario sia le politiche di sensibilizzazione ambientale — scaturite dai consessi internazionali precedentemente analizzati — sia l'attività di **ricerca e regolamentazione tecnica** nel settore dei materiali innovativi.

Tale approccio sinergico ha permesso di tradurre gli obiettivi climatici globali in protocolli normativi e standard prestazionali, incentivando lo sviluppo di soluzioni costruttive a ridotto impatto ambientale e promuovendo una transizione tecnologica basata su evidenze scientifiche.

Il Regolamento (UE) n. 305/2011 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 9 Marzo 2011, introduce importanti novità nell'ambito dei prodotti utilizzati per le opere di costruzione.

Prima di quel momento un prodotto da costruzione doveva soddisfare i sei requisiti di base, ovvero:

- Resistenza meccanica e stabilità
- Sicurezza in caso di incendio
- Igiene e salute ambientale
- Sicurezza e accessibilità in uso
- Protezione contro il rumore
- Risparmio energetico e ritenzione del calore

Viene quindi introdotto un nuovo requisito di base (il settimo) da dover soddisfare in sede progettuale, che prende il nome di “*Uso sostenibile delle risorse naturali*”.

Questo viene così definito: “*Le opere di costruzione devono essere concepite, realizzate e demolite in modo che l'uso delle risorse naturali sia sostenibile e garantisca in particolare quanto segue:*

- A. *Il riutilizzo o la riciclabilità delle opere di costruzione, dei loro materiali e delle loro parti dopo la demolizione*
- B. *La durabilità delle opere di costruzione*
- C. *L'uso, nelle opere di costruzione, di materie prime e secondarie ecologicamente compatibili.”*

Da qui ha inizio il ruolo di crescente importanza che acquisisce l'impiego di materie ecologicamente compatibili in sede progettuale.

Nel corso del primo decennio degli anni Duemila, l'Unione Europea ha istituzionalizzato la pratica del **Green Public Procurement (GPP)** — definita in ambito nazionale come **Acquisti Verdi nella Pubblica Amministrazione**. Tale approccio è stato formalizzato attraverso la Comunicazione della Commissione Europea n. 400 del 2008, dal titolo *'Appalti pubblici per un ambiente migliore'*.

Il GPP si configura come uno strumento di politica ambientale che consente alle Pubbliche Amministrazioni di integrare criteri ecologici all'interno delle procedure di acquisto e dei processi di approvvigionamento di beni, servizi e opere.

L'obiettivo è quello di stimolare il mercato verso lo sviluppo di soluzioni tecnologiche a ridotto impatto ambientale lungo l'intero ciclo di vita del prodotto.

Fondamento del GPP sono i Criteri Ambientali Minimi (CAM) per prodotti e servizi.

I CAM si occupano di:

- Riportare delle indicazioni generali volte ad indirizzare l'ente verso la razionalizzazione dei consumi e degli acquisti
- Forniscono delle considerazioni ambientali collegate alle diverse fasi delle procedure di gara
- Forniscono indicazioni su livelli minimi di prestazione ambientale che beni e servizi devono rispettare

La Commissione Europea ha individuato dieci comparti d'intervento prioritari per l'applicazione del **GPP**, selezionati in base al potenziale di miglioramento ambientale e alla rilevanza economica dei flussi di spesa pubblica.

Tra questi, assume un ruolo centrale il **settore delle costruzioni**, all'interno del quale la regolamentazione si estende all'intero ciclo di approvvigionamento delle materie prime e dei prodotti intermedi necessari per la realizzazione delle opere civili e infrastrutturali.

In ambito nazionale, il **Green Public Procurement** è stato introdotto attraverso il '*Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della Pubblica Amministrazione*' (**PAN GPP**), adottato con il Decreto Interministeriale dell'11 aprile 2008 e successivamente aggiornato con il Decreto del 10 aprile 2013.

Sebbene inizialmente configurato come strumento volontario, il GPP ha assunto carattere di **obbligatorietà** con l'entrata in vigore del D.Lgs. 50/2016.

Tale principio è stato pienamente recepito e consolidato dal vigente **Codice dei Contratti Pubblici (D.Lgs. 36/2023)**, che impone l'integrazione dei criteri di sostenibilità ambientale nelle procedure di affidamento, sancendo il ruolo strategico degli acquisti pubblici nel perseguimento degli obiettivi di transizione ecologica.

Il **PAN** ha l'obiettivo di massimizzare la diffusione del GPP presso gli enti pubblici, ne definisce gli obiettivi nazionali ed identifica le categorie di beni, servizi e lavori di intervento sulle quali vanno definiti i Criteri Ambientali Minimi.

I **CAM** rappresentano i requisiti tecnico-ambientali stabiliti per le diverse fasi del processo di approvvigionamento pubblico. La loro finalità risiede nell'individuazione delle soluzioni progettuali e tecnologiche a minore impatto ambientale lungo l'intero **ciclo di vita (Life Cycle)**, bilanciando le prestazioni ecologiche con l'effettiva disponibilità tecnologica del mercato.

All'interno delle categorie merceologiche normate, riveste particolare importanza il settore dell'**edilizia**, che integra prescrizioni specifiche riguardanti l'impatto ambientale dei materiali costruttivi. Nello specifico, per quanto concerne i calcestruzzi (siano essi confezionati in cantiere o preconfezionati), la normativa impone criteri stringenti per la sostenibilità della miscela: è richiesto, infatti, che il calcestruzzo impiegato nel progetto sia caratterizzato da un contenuto di **materiale riciclato**, recuperato o sottoprodotto, pari ad almeno il **5% in peso** rispetto al totale della miscela (valutato sul secco).

5.3 I NUOVI CEMENTI

Sotto il profilo tecnico-normativo, la classificazione e i requisiti dei leganti idraulici sono disciplinati dalle norme **UNI EN 197-1:2011** e dalla più recente **UNI EN 197-5:2021**.

Quest'ultima, in particolare, si pone in continuità con il quadro normativo precedente, ampliando la gamma dei **cementi comuni** attraverso l'introduzione di nuove tipologie di leganti ternari e compositi. L'orientamento attuale di tali normative favorisce la progressiva riduzione del **fattore di clinker** (*clinker factor*) all'interno delle miscele, promuovendo la sostituzione del Cemento Portland con **materiali cementizi supplementari (SCMs)** a ridotta impronta carbonica, senza pregiudicare le prestazioni meccaniche e la durabilità dei manufatti.

La selezione della miscela cementizia più idonea è determinata dalle competenze tecniche del **progettista** e dalle specifiche condizioni di esercizio e destinazione d'uso dell'opera.

Il quadro normativo vigente è stato strutturato per garantire che, attraverso il rigoroso rispetto delle proporzioni e delle classi di resistenza definite, il prodotto finale assicuri i **requisiti prestazionali prefissati** in termini di sicurezza strutturale e durabilità.

La conformità a tali standard normativi permette dunque di minimizzare l'incertezza tecnica, assicurando che il materiale risponda adeguatamente alle sollecitazioni meccaniche e ambientali previste in fase di progetto.

La normativa UNI EN 197-1: “*Composizione, specifiche e criteri di conformità per i cementi comuni*” elenca gli 8 costituenti principali dei cementi comuni che sono rispettivamente: **Clinker (K)**, **Loppa d’altoforno (S)**, **Fumo di silice (D)**, **Pozzolana naturale (P)** o **naturale calcinata (Q)**, **Cenere volante silicea (V)** o **calcare (W)**, **Scisto calcinato (T)** e **Calcare (L o LL)**.

È da questa varietà di costituenti che deriva il numero rilevante di tipi e sottotipi di cemento inclusi nella norma.

Viene infatti prevista la distinzione di 5 tipi di cemento, 27 sottotipi (di cui 26 contenenti almeno un secondo costituente principale oltre al Clinker K) che si differenziano in base al costituente principale ed alla percentuale di cui se ne fa uso, e 6 classi di resistenza.

I 5 tipi di cementi comuni, conformi alla norma sono:

- Cementi di tipo I (CEM I), “Cementi Portland”, costituiti almeno per il 95% da clinker;
- Cementi di tipo II (CEM II), “Cementi Portland di miscela”, costituiti da clinker in una percentuale compresa fra il 65% ed il 94%. La restante parte è costituita da loppa d’altoforno, fumi di silice, pozzolana, ceneri volanti, scisto calcinato o calcare. I costituenti minori possono ricadere in due range: 6-20%, al quale corrisponde la lettera A, o 21-35% cui segue la lettera B;
- Cementi di tipo III (CEM III), “Cementi d’altoforno”, costituiti fino al 64% da clinker e loppa granulata d’altoforno che può essere impiegata in tre possibili range di percentuali individuate dalle lettere A, B e C;
- Cementi di tipo IV (CEM IV) “Cementi pozzolanici”, costituiti da clinker per 65%-89% per il range A o tra 45%-89% per il range B, con pozzolana naturale o artificiale;
- Cementi di tipo V (CEM V) “Cementi compositi”, costituiti da un ridotto contenuto di clinker (variabile in percentuale da 40%-60% fino ad arrivare al range 20%-39%) e da una miscela di loppa e pozzolana.

Tabella 1: Tabella Normativa contenuta nelle UNI EN 197-1

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)		Costituenti principali										Costituenti secondari	
			Clinker	Loppa di altoforno	Fumo di silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare			
						naturale	naturale calcinata	silicea	calcareo		L	LL		
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM II	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland alla pozzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland alle ceneri volanti	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland allo scisto calcinato	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5	
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5	
	Cemento Portland al calcare	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
	Cemento Portland composito	CEM II/A-M	80-88	-----12-20-----										0-5
		CEM II/B-M	65-79	-----21-35-----										0-5
CEM III	Cemento d'altoforno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Cemento pozzolanico	CEM IV/A	65-89	-	-----11-35-----					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	-----36-55-----					-	-	-	0-5	
CEM V	Cemento composito	CEM V/A	40-64	18-30	-	-----18-30-----			-	-	-	0-5		
		CEM V/B	20-38	31-49	-	-----31-49-----			-	-	-	0-5		

Dall'analisi del quadro normativo emerge come la maggior parte dei leganti impiegati nel mercato europeo sia riconducibile a sistemi **binari**, caratterizzati dall'associazione tra clinker di Portland e un singolo costituente principale aggiuntivo.

Tuttavia, la normativa disciplina anche sistemi più complessi, definiti **cementi compositi o ternari**, i quali prevedono l'integrazione di un numero superiore di componenti (solitamente non oltre i tre costituenti principali).

All'interno di questa categoria si collocano le tipologie **CEM II/A-M, CEM II/B-M, CEM IV e CEM V**, le quali permettono una calibrazione più precisa delle proprietà chimico-fisiche del legante attraverso l'azione sinergica dei diversi materiali cementizi supplementari (SCMs).

L'evoluzione del quadro normativo sopra delineato si è sviluppata in stretto allineamento con le istanze internazionali volte alla decarbonizzazione del settore delle costruzioni.

In questo contesto, il **Comitato Tecnico Europeo di Normazione (CEN/TC 51)** ha recentemente licenziato la norma **UNI EN 197-5**, introducendo nuove tipologie di **cementi ternari**.

La peculiarità di tali leganti risiede in una matrice complessa, in cui il clinker di Portland viene parzialmente sostituito da una combinazione sinergica di **due distinti costituenti principali**, ottimizzando così il profilo ambientale del materiale senza comprometterne i requisiti prestazionali.

Nello specifico, la norma **UNI EN 197-5** introduce e disciplina il **cemento Portland composito CEM II/C-M** e il **cemento composito CEM VI**, tipologie precedentemente non contemplate dalla UNI EN 197-1.

L'introduzione di tali categorie riflette la necessità di integrare leganti a più basso fattore di clinker, destinati al confezionamento di calcestruzzi e malte con un profilo ambientale ottimizzato. Questi nuovi leganti permettono di spingere le percentuali di sostituzione del clinker oltre i limiti tradizionali, garantendo al contempo la conformità ai requisiti prestazionali necessari per le applicazioni strutturali e non.

L'inclusione di altri tipi di cemento nella nuova norma è dovuta al superamento dell'ideologia che era alla base della precedente, che prevedeva l'utilizzo di miscele con una lunga esperienza d'utilizzo. È stato considerato che cementi con composizioni differenti rispetto a quelle specificate nella EN 197-1 potessero comunque presentare proprietà tali per cui le opere, se ben progettate, potessero soddisfare i sette requisiti previsti dal Regolamento (UE) 305/2011 sopra citato.

L'inserimento del nuovo legante è avvenuto anche e soprattutto a valle dell'intensa attività di ricerca pre-normativa, atta a verificarne l'idoneità dal punto di vista prestazionale e basata sul protocollo di prove specificate nel CEN/TR 16912.

Le nuove miscele di cemento sono state create seguendo i criteri che seguono:

- Ridurre il contenuto di clinker, il costituente che più di tutti contribuisce all'impronta di CO₂ del cemento
- Estendere l'impiego di costituenti consistenti di materie secondarie di processi industriali, come la loppa d'altoforno o di materie con ridotta impronta di CO₂ quali la pozzolana naturale e ottenuta dalla cottura di argille, lo scisto calcinato ed il calcare.
- Sfruttare gli effetti sinergici che possono prodursi utilizzando determinate combinazioni di costituenti.

I due cementi ternari considerati dalla 197-5 sono:

- CEM II/C-M, “Cemento Portland Composito”, è lo sviluppo dei cementi Portland Compositi CEM II/A e CEM II/B già esistenti. È stato ottenuto riducendo il quantitativo di clinker al 50%.
- CEM VI, “Cemento Composito”, contenente, oltre al clinker ed alla loppa, un altro costituente tra pozzolana, cenere volante silicea e calcarea, la cui percentuale può arrivare al 20%.

Tabella 2: Composizione dei cementi indicata nella UNI EN 197-5

Tipi principali	Denominazione dei prodotti (tipi di cemento)		Costituenti principali										Costituenti secondari
			Clinker	Loppaialtoforno	Fumodisilice	Pozzolana		Cenere volante		Scistocalcinato	Calcare		
						naturale	naturalecalcinata	silicea	calcarea				
	Nome	Denominazione	K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEM II	Cemento Portland- composito	CEM II / C-M	50-64	-----36-50-----								0-5	
CEM VI	Cemento Composito	CEM VI (S-P)	35-49	31-59	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM VI (S-V)	35-49	31-59	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM VI (S-L)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5

L'analisi delle composizioni definite dai nuovi standard normativi evidenzia una chiara strategia volta alla minimizzazione del **fattore di clinker** nei leganti di ultima generazione.

In tale contesto, la norma UNI EN 197-5 attribuisce un ruolo sussidiario ma fondamentale al **calcare**, il cui impiego è consentito fino a un limite del 20% in massa.

Il superamento della concezione del calcare come mero materiale inerte deriva dalla recente evidenza scientifica circa il suo contributo attivo alle proprietà del conglomerato: se finemente macinato, esso agisce infatti come **centro di nucleazione eterogenea**, accelerando la cinetica di idratazione delle fasi silicatiche.

Tale fenomeno, unitamente all'**effetto filler**, favorisce un incremento delle resistenze meccaniche alle brevi stagionature e una densificazione della microstruttura della pasta cementizia.

6 MATERIALI UTILIZZATI

Il presente lavoro di tesi si pone l'obiettivo di **valutare l'efficacia di differenti additivi chimici commerciali** sulle proprietà fisico-meccaniche di conglomerati cementizi basati sulla tecnologia **LC3** (*Limestone Calcined Clay Cement*).

L'indagine sperimentale prevede un'analisi comparativa sistematica rispetto a una miscela di riferimento prodotta con cemento Portland tradizionale, al fine di determinare l'influenza dei suddetti additivi sulle prestazioni del nuovo legante ternario.

Al fine di perseguire tale obiettivo, la campagna sperimentale ha previsto il confezionamento di **due diverse tipologie di miscele cementizie**, analizzate sotto forma di **malte standardizzate**.

Nello specifico, sono stati realizzati impasti basati rispettivamente su un cemento Portland di riferimento e sul legante innovativo LC3; tale scelta metodologica è volta a isolare il comportamento della matrice legante, permettendo una valutazione puntuale dell'interazione tra i diversi additivi chimici e le specifiche fasi mineralogiche del sistema ternario.



Figura 10: Diagramma dei componenti della malta cementizia

Fonte: Elaborazione dell'autore tramite IA generativa

La malta è un conglomerato formato da legante, inerte fine con granulometria fra **0,063 e 8 mm** (sabbia) ed acqua.

6.1 INERTE

Gli **inerti** rivestono un ruolo di fondamentale importanza nella tecnologia dei conglomerati cementizi, arrivando a costituire circa i due terzi del volume totale del calcestruzzo.

L'attuale tendenza normativa, orientata alla riduzione del fattore di clinker a favore di una maggiore frazione lapidea, ha ulteriormente enfatizzato la centralità di questo componente.

Per garantire elevate prestazioni, è necessaria una **distribuzione granulometrica** quanto più possibile continua e differenziata; tale configurazione permette alle frazioni fini di colmare i vuoti interstiziali lasciati dai granuli di dimensioni maggiori.

L'ottimizzazione dello **scheletro granulometrico** e la conseguente riduzione della porosità intergranulare risultano determinanti per massimizzare la compattezza del materiale, incrementando sensibilmente sia la resistenza meccanica sia la **durabilità** dell'opera finita.

Gli inerti vengono classificati in base al loro diametro in:

- **Filler**, inerti finissimi con diametro inferiore a 0,063 mm
- **Sabbia**, inerti fini con diametro che ricada fra gli 0,063 e 4 mm
- **Ghiaia**, inerti grossi con diametro al di sopra dei 4 mm.

Per lo svolgimento dell'attività sperimentale oggetto del presente studio, si è reso necessario l'impiego delle prime due classi granulometriche di aggregato.

Nello specifico, il **filler** e la **sabbia** sono stati utilizzati come componenti essenziali per il confezionamento delle malte cementizie, garantendo la corretta proporzione tra i costituenti fini della miscela.

6.1.1 LA SABBIA

Per il confezionamento delle miscele è stata impiegata una sabbia naturale di origine alluvionale, con una composizione mineralogica prevalentemente **siliceo-calcareo**, caratterizzata da una distribuzione granulometrica **0/6 mm** e conforme alla norma **UNI EN 12620**.

Tale aggregato è stato selezionato per simulare le condizioni reali di produzione dei conglomerati, garantendo al contempo la rispondenza ai requisiti di purezza e distribuzione necessari per l'ottenimento di un impasto omogeneo.

È opportuno precisare che l'aggregato impiegato presentava uno stato di **umidità naturale** e non preventivamente essiccato. Di conseguenza, in fase di **mix design**, si è reso necessario computare il contenuto d'acqua presente nei pori e sulla superficie dei granuli, al fine di stornare tale aliquota dalla quantità di acqua di impasto prevista.

6.1.2 IL FILLER CALCAREO

Con il termine filler si intende un inerte finissimo con $d < 0.063$ mm.

Un cemento confezionato con un alto contenuto di filler a parziale sostituzione del CEM I lo rende più sostenibile sotto i punti di vista ambientale ed economico.

È proprio per questi motivi che la nuova normativa sui cementi ha ampliato il range di utilizzo del filler calcareo per il confezionamento di miscele cementizie.

Il calcare è inoltre economicamente conveniente, in quanto il suo processo di produzione, estrazione e macinazione compresi è molto meno dispendioso rispetto a quello per l'ottenimento del Cemento Portland.

6.2 ACQUA

Nella tecnologia delle malte e dei conglomerati cementizi, l'acqua riveste un ruolo determinante, rappresentando una variabile tanto critica quanto il dosaggio del legante stesso.

Il volume d'acqua impiegato è, infatti, il principale parametro in grado di influenzare le proprietà del materiale sia allo **stato fresco** — in termini di lavorabilità e tempi di inizio e fine presa — sia allo **stato indurito**, attraverso il controllo del **rapporto acqua/legante**.

Tale componente non assolve esclusivamente una funzione di lubrificante per lo scorrimento degli aggregati, ma agisce come reagente essenziale per l'**attivazione dei processi di idratazione**.

Sono proprio queste reazioni chimiche a innescare i fenomeni di presa e il successivo sviluppo delle resistenze meccaniche (indurimento), trasformando l'impasto fluido in uno scheletro solido e resistente.

Allo stato fresco, il dosaggio d'acqua è il principale responsabile dei fenomeni di **bleeding** (essudazione) e **segregazione**; tali processi compromettono l'omogeneità del sistema, provocando la separazione tra la fase liquida, la pasta cementizia e gli aggregati, con conseguenti ripercussioni negative sulla resistenza meccanica e sulla durabilità del manufatto finale.

Durante la miscelazione, l'acqua agisce sulle particelle di legante generando forze di coesione che conferiscono lavorabilità all'impasto.

Tali forze scaturiscono dallo sviluppo dei primi prodotti di idratazione sulla superficie dei granuli e risultano fondamentali per stabilizzare la miscela, riducendo il rischio di separazione dei componenti.

Tuttavia, è necessario che tali legami non si sviluppino con eccessiva rapidità, al fine di evitare un prematuro decadimento della lavorabilità (*slump loss*); tale criticità può manifestarsi, ad esempio, qualora le operazioni di getto avvengano in condizioni ambientali caratterizzate da **temperature elevate**, che accelerano la cinetica di idratazione.

6.2.1 SUPERFLUIDIFICANTE

L'impiego dei superfluidificanti risulta determinante per ottimizzare le prestazioni del calcestruzzo, in quanto tali additivi operano una profonda modifica della reologia dell'impasto.

Il loro meccanismo d'azione si basa sulla capacità di adsorbimento sulle particelle di legante, che conferisce a queste ultime una carica elettrica superficiale dello stesso segno.

La conseguente **repulsione elettrostatica**, unita in molti casi all'**ingombro sterico** tipico dei polimeri di nuova generazione, induce la rottura dei floccoli di cemento (effetto deflocculante).

Questo processo libera l'acqua d'impasto precedentemente intrappolata negli agglomerati di particelle, rendendola disponibile per la fluidificazione del sistema. Grazie a tale fenomeno, è possibile ottenere un'elevata lavorabilità mantenendo rapporti $\frac{S}{I}$ estremamente contenuti, garantendo così il raggiungimento di elevate resistenze meccaniche e una superiore compattezza della matrice.

In una sospensione di acqua e cemento, i granuli di legante tendono naturalmente ad aggregarsi in strutture irregolari.

Tale fenomeno, noto come **flocculazione**, è riconducibile all'attrazione elettrostatica tra le diverse fasi mineralogiche dei granuli, le quali presentano cariche di segno opposto sulla propria superficie. Queste cariche si originano sia per effetto dei processi di macinazione industriale, sia a causa della parziale dissociazione ionica che avviene al primo contatto con l'acqua.

L'introduzione del **superfluidificante** inverte tale tendenza favorendo la **deflocculazione**, ovvero la dispersione omogenea dei granuli all'interno della miscela.

A livello macroscopico, questa stabilizzazione del sistema si traduce in un significativo incremento della lavorabilità e della fluidità dell'impasto, pur mantenendo invariato il contenuto d'acqua.

Il superfluidificante quindi consente di:

- Migliorare la lavorabilità degli impasti a pari contenuto di acqua e cemento
- Aumentare Rck e durabilità, riducendo l'acqua e di conseguenza anche il rapporto a/c (a pari lavorabilità e pari contenuto di cemento)
- Ridurre il ritiro igrometrico, riducendo l'acqua ed il cemento, quindi a pari a/c e pari lavorabilità.

6.3 LEGANTE

6.3.1 CEMENTO PORTLAND

In questo studio è stato utilizzato un CEM I, la cui classe di resistenza è 52.5N.



Figura 11: CEM I 52.5 N utilizzato per le sperimentazioni

6.4 ARGILLA

L'utilizzo dell'argilla per il confezionamento di miscele cementizie, sebbene porti ad un decremento drastico delle emissioni inquinanti del prodotto finito, ha presenta alcune criticità intrinseche.

Una su tutte è la notevole differenziazione in termini di composizione chimica che si ha trattando argille estratte in diverse parti del mondo.

A seconda dell'ubicazione della cava le argille possiedono differenti composizioni e, di conseguenza, i materiali che se ne ricaveranno svilupperanno differenti proprietà meccaniche.

7 PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DELLE SABBIE

Le prove di caratterizzazione delle sabbie sono passaggi fondamentali nel **mix design** della malta, poiché le proprietà dell'aggregato fine influenzano direttamente sia il materiale allo stato fresco che le prestazioni finali del manufatto indurito.

7.1 CALCOLO DELL'UMIDITÀ $u\%$ DELLA SABBIA

La determinazione del contenuto di umidità della sabbia rappresenta una fase critica del processo di **proporzionamento delle miscele** (*mix design*).

Gli aggregati, a causa della loro porosità e della natura idrofila delle superfici, raramente si trovano in uno stato di completa essiccazione; al contrario, essi presentano quasi sempre un'aliquota d'acqua, definita **umidità naturale**, che deve essere accuratamente quantificata.

7.1.1 ESECUZIONE DELLA PROVA

Inizialmente, è stato misurato il peso di ciascun contenitore vuoto, al fine di determinare la **tara** (in grammi). Successivamente, da ogni sacco è stato estratto un campione di materiale e ne è stato misurato il **peso lordo del materiale umido (PLU)**. Sottraendo la tara al peso lordo, è stato calcolato il **peso netto del materiale umido (PNU)**.

Tabella 3: Dati di pesatura del materiale umido

N° sacco	Tara (g)	PLU (g)	PNU (g)
1	22.60	1063.82	1041.22
2	23.06	1057.14	1034.08
3	22.34	1070.20	1047.86

Dopo un periodo di essiccazione di **sette giorni**, i tre campioni sono stati estratti dal forno (impostato a 100°C) per le successive analisi.

Il materiale risultava completamente essiccato, pertanto è stato possibile procedere con tutte le misurazioni necessarie.

I tre campioni sono stati pesati per determinare i rispettivi **pesi lordi del materiale secco (PLS)**. Successivamente, sottraendo la tara di ciascun contenitore, sono stati calcolati i **pesi netti del materiale secco (PNS)**.

Tabella 4: Dati di pesatura per il calcolo dell'umidità dei campioni

N° sacchi	Tara (g)	PNU (g)	PLS (g)	PNS (g)
1	22.60	1041.22	1005.53	982.93
2	23.06	1034.08	996.56	973.50
2	22.34	1047.86	1020.07	997.73

Una volta determinati i **pesi netti del materiale**, è stato possibile calcolare l'**umidità** di ciascun campione utilizzando la seguente formula: $u\% = \frac{Pu - Ps}{Ps} * 100$

È stata quindi calcolata l'**umidità** per ciascun sacco:

- Sacco 1: $u\% = \frac{1041.22-982.93}{982.93} * 100 = 5.93\%$
- Sacco 2: $u\% = \frac{1034.08-973.50}{973.50} * 100 = 6.22\%$
- Sacco 3: $u\% = \frac{1047.86-997.73}{997.73} * 100 = 5.02\%$

7.2 PROVA DEL CASTELLETTO

È stato prelevato un ulteriore campione di materiale per poter eseguire la **Prova del Castelletto**. Questa prova è stata eseguita al fine di valutare l'**assorbimento d'acqua da parte dei materiali fini** presenti nel campione.

Il materiale è stato posto all'interno di un contenitore di plastica trasparente, al quale è stata aggiunta acqua fino a sommergerlo completamente. La miscela è stata lasciata riposare per un periodo di 24 ore, in modo da consentire la **saturatione completa** dei pori del materiale.

Passate le 24 ore abbiamo eseguito la Prova del Castelletto. Questa prova, sebbene non fornisca un dato quantitativo preciso, risulta utile per una **valutazione qualitativa preliminare** dell'assorbimento nei materiali fini e per identificare la **presenza di frazioni che possono influenzare negativamente** le caratteristiche meccaniche del materiale in applicazioni geotecniche o edilizie.

Per prima cosa è stata rimossa l'acqua dal contenitore e si è proceduto con una **prova preliminare**, finalizzata ad avere un riferimento.

A tal fine, è stato utilizzato un bicchierino di carta, al quale è stata tagliata l'estremità inferiore per facilitare il riempimento con il materiale, oltre a un pestello e una piccola sessola per raccogliere il campione.

Il bicchierino è stato quindi riempito con il materiale e, mediante l'uso del pestello, il contenuto è stato compattato al suo interno. Successivamente, il bicchierino è stato sollevato per verificare l'eventuale presenza di fenomeni di **frammento** del materiale.



Figura 12: Materiale saturo d'acqua

Dopo aver eseguito la prima prova, è stato ricreato un letto di sabbia che è stato successivamente essiccato con l'ausilio di un phon.

La prova è stata ripetuta più volte fino al raggiungimento di un evidente franamento del campione, condizione che indica il raggiungimento dello **stato di superficie satura asciutta (SSA)**.



Figura 13: Stato di superficie satura asciutta

È stato fondamentale prestare attenzione a **non essiccare completamente il materiale**, poiché un'essiccazione eccessiva avrebbe comportato l'**espansione totale del campione**, rendendo necessario ripetere la prova dall'inizio.

Una volta raggiunto lo **stato di superficie satura asciutta (SSA)**, è stato possibile procedere con le misurazioni. In primo luogo, è stato determinato il **peso del contenitore vuoto**, al fine di calcolare la tara. Successivamente è stato misurato il **peso lordo del materiale in condizioni SSA (PL_{SSA})**.

I valori rilevati sono stati i seguenti:

Peso contenitore (Tara): 176.41 g

Peso Lordo SSA (PL_{SSA}): 782.15 g

Peso Netto SSA (PN_{SSA}): $PN_{SSA} = PL_{SSA} - \text{Tara} = 782.15 - 176.41 = 605.74$ g

Al termine della misurazione, il contenitore è stato posto in **forno**, insieme agli altri campioni, al fine di completare l'essiccazione del materiale e valutare l'assorbimento d'acqua nella sabbia.

Trascorsi cinque giorni, il campione di sabbia è stato rimosso dal forno (impostato a 100°C), avendo raggiunto lo stato di completa essiccazione e sono state effettuate le misurazioni necessarie.

In primo luogo, è stato determinato il **peso lordo secco (PLs)**, dal quale è stata sottratta la **tara**, ottenendo così il **peso netto secco (PNs)**:

Peso Lordo secco (PLs): 765.52 g

Tara: 26.61 g

Peso Netto secco (PNs): $PLs - \text{Tara} = 765.52 - 26.61 = 589.11$ g

Successivamente, è stato calcolato il **grado di assorbimento d'acqua (a%)** del materiale secondo la seguente formula:

$$a\% = \frac{PN_{ssa} - PN_s}{PN_s} * 100 = \frac{605.74 - 589.11}{589.11} * 100 = 2.82\%$$

7.3 GRANULOMETRIA

Dopo aver essiccato completamente il materiale, è stato possibile procedere con la valutazione della **granulometria**. A tale scopo, è stato utilizzato un **vaglio meccanico da laboratorio** per analisi granulometriche.

L'**analisi granulometrica** è una tecnica fondamentale nell'ambito delle **scienze dei materiali**, dell'**ingegneria civile** e della **geotecnica**, utilizzata per determinare la **distribuzione delle dimensioni delle particelle** in un campione di materiale incoerente, come sabbia, ghiaia o altri aggregati.

Questa caratterizzazione è essenziale per valutare la **lavorabilità**, la **compattabilità**, la **permeabilità** e il **comportamento meccanico** del materiale in diverse applicazioni ingegneristiche.

Il **vaglio meccanico da laboratorio** consente di eseguire in modo automatico e uniforme la setacciatura dei campioni. L'apparecchiatura è composta da:

- un **sistema vibrante o oscillante**, che favorisce la separazione efficace delle particelle;
- una **serie di setacci normalizzati** (secondo norme UNI, ASTM o ISO), con aperture definite;
- un **contenitore di raccolta** posto alla base, destinato a raccogliere la frazione passante attraverso l'ultimo vaglio.

Secondo normativa, i setacci devono essere **disposti in ordine decrescente di apertura** (dal più grande al più piccolo) e generalmente seguono una progressione con **aperture che si dimezzano** tra un setaccio e l'altro.

Tali setacci devono appartenere a **serie normalizzate** (UNI, EN, ISO) con aperture prefissate. Il **numero e la sequenza** dei setacci vengono scelti in funzione della **precisione richiesta** e della **natura del materiale** da analizzare.

Nella presente sperimentazione, è stata utilizzata una pila di setacci con aperture comprese tra **16 mm** e **0.063 mm**, secondo la norma UNI EN 933-1.

Prima della setacciatura, è stata determinata la **tara di ciascun setaccio**, in modo da poter calcolare successivamente la **massa del materiale trattenuto** su ciascuna maglia.



Figura 14: Pila di setacci

È stato prelevato un campione di **983.26 g**, successivamente inserito nella parte superiore della pila di setacci. La **torre di setacci** è stata collocata all'interno del **vaglio meccanico da laboratorio**, che è stato attivato per un tempo standard di **10 minuti**. Durante questo intervallo, le particelle si sono progressivamente separate in base alla loro **dimensione granulometrica**. Il dispositivo ha effettuato una **vibrazione combinata a un movimento rotatorio in senso orario**, favorendo una distribuzione efficace del materiale sui diversi setacci.



Figura 15: Setacciatrice vibrante

Al termine, il contenuto di ogni setaccio viene pesato singolarmente per determinare la **percentuale di massa trattenuta** su ciascuna maglia. Questi dati vengono poi utilizzati per calcolare la **percentuale di passante** e rappresentare i risultati sotto forma di **curva granulometrica**.

Tabella 5: Analisi granulometrica della sabbia 0/6

Granulometria Sabbia 0/6

Setaccio (mm)	Tara (g)	Plordo (g)	Pnetto (g)	Percentuale di trattenuto parziale (%)	Percentuale di passante (%)
16	636.92	636.92	0	0.00	100.00
8	535.33	538.30	2,97	0.30	99.70
4	476.16	570.17	94,01	9.56	90.14
2	504.03	823.46	319,43	32.49	57.65
1	397.09	612.40	215.31	21.89	35.76
0,5	460.47	612,45	151.98	15.46	20.30
0,25	422.87	556,83	133.96	13.63	6.67
0,125	412.68	467,53	54.85	5.58	1.09
0,063	395.27	402,99	7.72	0.79	0.30
Fondo	459.70	462,73	3.03	0.31	0.00

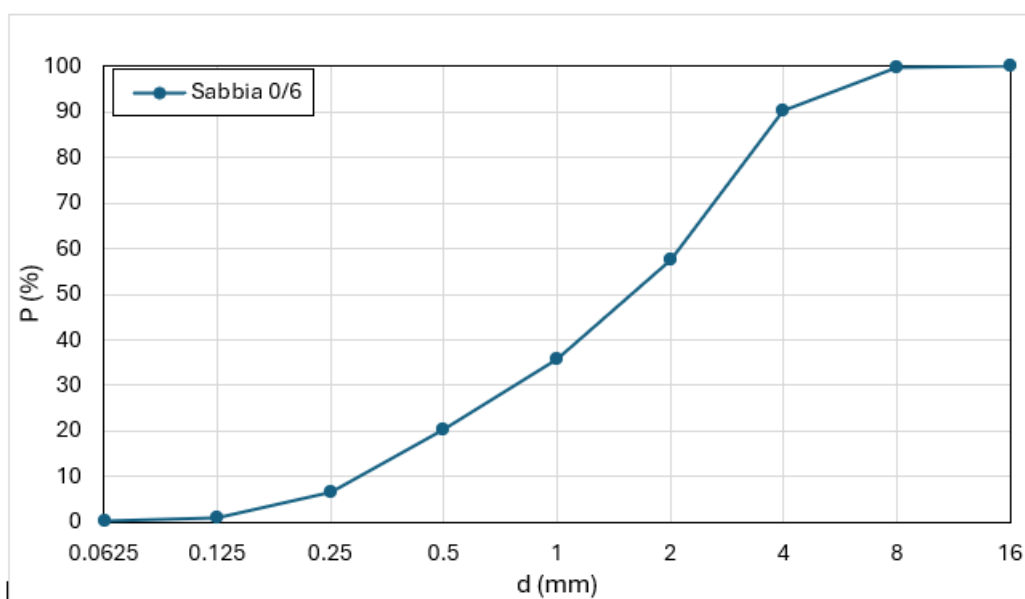


Figura 16: Curva granulometrica della sabbia 0/6

8 OTTIMIZZAZIONE DEL DOSAGGIO DEGLI ADDITIVI SUPERFLUIDIFICANTI

La determinazione del dosaggio ottimale degli additivi superfluidificanti è stata condotta attraverso un protocollo sperimentale a due fasi: una fase preliminare di **Mini-Slump test su pasta cementizia** e una successiva validazione mediante **Slump test su malta**.

8.1 MINI SLUMP TEST SU PASTA CEMENTIZIA

Il controllo della lavorabilità di miscele cementizie è un aspetto fondamentale per garantire la qualità, la durabilità e la messa in opera dei materiali da costruzione. Tra i metodi più diffusi per valutare la consistenza del calcestruzzo fresco si trova lo **slump test**, una prova empirica semplice e veloce, standardizzata dalla normativa UNI EN 12350-2.

Tuttavia, in contesti di ricerca, sviluppo di nuovi materiali (come le **malte modificate** o **geopolimeri**) o in situazioni in cui sono disponibili solo piccole quantità di miscela, si ricorre spesso a una sua variante in scala ridotta: il **mini slump test**.

Questa prova mantiene lo stesso principio del test, standard, misurare la perdita di altezza o l'espansione laterale del materiale dopo la rimozione di un troco di cono **di dimensioni ridotte** (diametro interno superiore: 18mm, diametro interno inferiore: 56mm, altezza: 65mm), permettendo di lavorare con volumi minimi, riducendo gli sprechi ed allo stesso tempo di valutare il comportamento della pasta allo stato fresco.

Il **mini-slump test** si è rivelato particolarmente utile nella caratterizzazione di **malte cementizie**, **paste leganti** e materiali innovativi, offrendo una stima rapida della lavorabilità nella pasta fresca con e senza superfluidificante, parametri cruciali per la sua applicazione in cantiere o in laboratorio.

Sono stati testati due diversi leganti: il **Cemento Portland 52.5N (OPC)** e un **LC3** creando diverse miscele per ogni legante di cui una senza additivo superfluidificante e le restanti 3 con 3 additivi superfluidificanti diversi in quantità pari a 0.8% sul peso del legante per indagarne il comportamento.

8.1.1 MINI SLUMP TEST: LC3

Dati:

- LC3: 166.30 g
- Rapporto acqua-legante, w/c: 0.31
- Acqua: 51.60 g
- Dosaggio SPs: 0.80%
- SPs : 1.33 g

Procedura sperimentale:

1. È stato preparato il legante LC3 secondo la composizione sopra indicata.

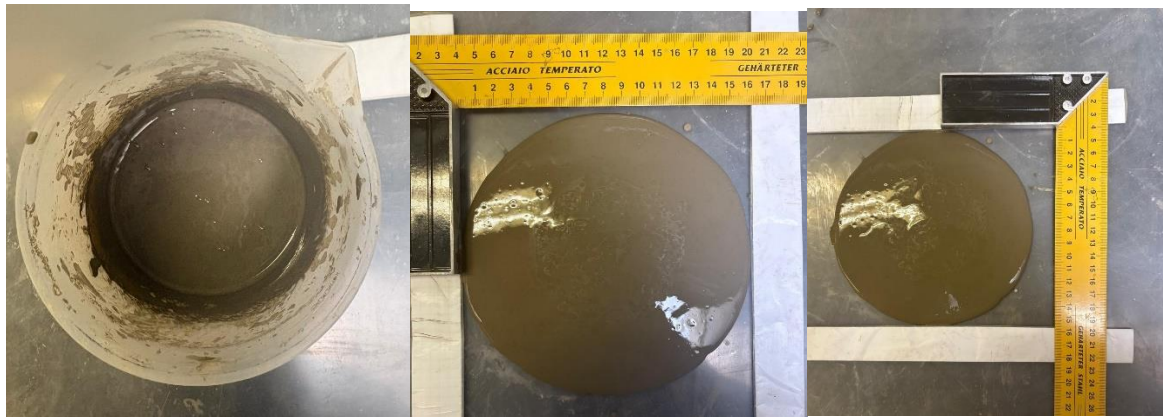
2. Sono stati pesati i componenti: **166.30 g di legante**, **51.60 g di acqua** e **1.33 g di SPs** (quando previsto).
3. La miscela è stata omogeneizzata per circa **4 minuti**, utilizzando un frullatore elettrico. L'acqua e il superfluidificante sono stati aggiunti **gradualmente** durante la miscelazione.
4. Una volta ottenuta una miscela omogenea, il materiale è stato inserito all'interno del **cono per mini-slump**, precedentemente **lubrificato con un disarmante** (in questo caso è stato utilizzato l'olio d'oliva, in quanto facilmente e rapidamente impiegabile; ciò non implica che altri disarmanti convenzionali non siano altrettanto efficaci), per evitare l'adesione alle pareti.
5. Durante il riempimento, è stato utilizzato un **pestello** per favorire la compattazione della pasta creata, e le pareti esterne del cono sono state leggermente battute con un **martelletto** per rimuovere eventuali **bolle d'aria** presenti.
6. Dopo il riempimento, il cono è stato sollevato **lentamente e con attenzione**.
7. È stato quindi misurato lo **spandimento orizzontale** della pasta in due direzioni ortogonali. La media delle due misurazioni è stata utilizzata per determinare lo **slump medio**.
8. Infine, una parte della miscela è stata trasferita in **contro-tappi** per valutarne il comportamento in fase di indurimento.

Sono stati preparati **quattro campioni**:

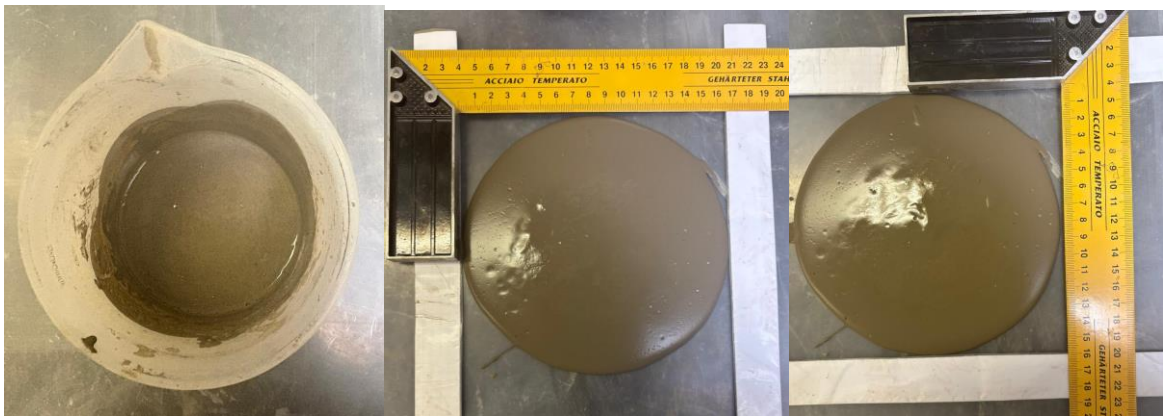
1. **Reference** (senza superfluidificante)



2. Campione con **SPs1**



3. Campione con SPs2



4. Campione con SPs3

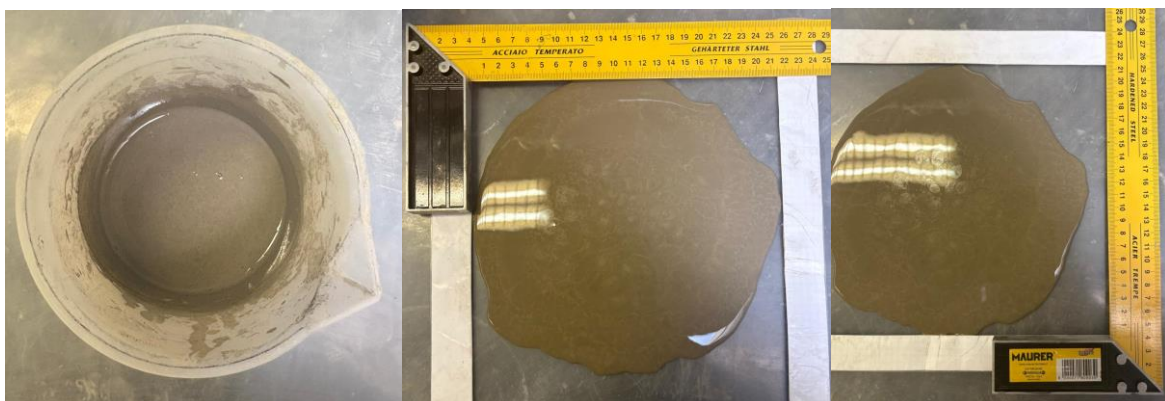


Tabella 6: Risultati LC3

DATI: OLC3							
SPs	SPs % wt	SPs (g)	Binder	Binder (g)	w/b	Water (g)	Spread diameter (cm)
			OLC3	166,24	0,31	51,65	5,60
SPs1	0,80	1,33	OLC3	166,29	0,31	51,60	16,00
SPs2	0,80	1,34	OLC3	166,30	0,31	51,59	16,30
SPs3	0,80	1,34	OLC3	166,34	0,31	51,59	21,50

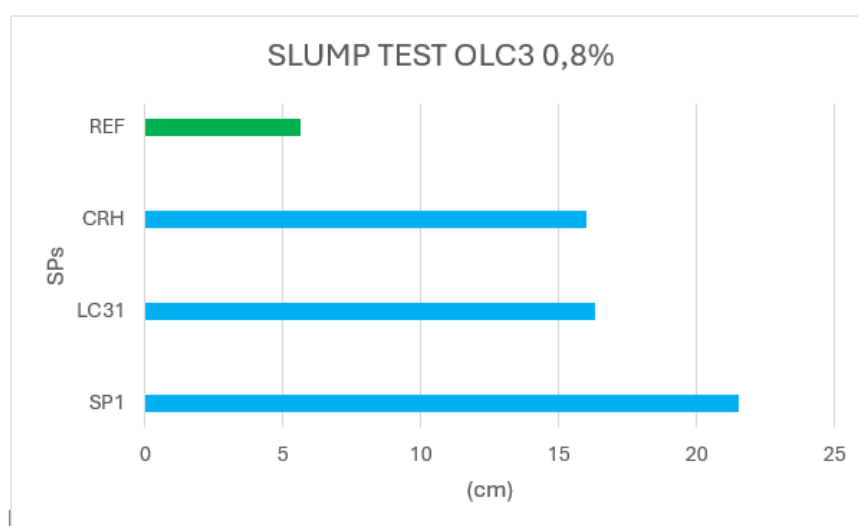


Figura 17: Confronto risultati LC3

8.1.2 MINI SLUMP TEST: OPC

Sono state ripetute le prove di mini-slump test utilizzando gli stessi **superfluidificanti (SPs)** impiegati nei test precedenti, ma sostituendo il legante **LC3** con **OPC (Ordinary Portland Cement)**.

Nello specifico, è stato utilizzato **CEM I 52.5N** come cemento di riferimento. Di conseguenza, sono state modificate anche le dosi dei componenti e il **rapporto acqua/legante (w/c)**, per adattarsi alle caratteristiche del nuovo legante (nel caso dell'LC3 è stato usato un rapporto w/c di 0,31 in quanto è il minimo quantitativo di acqua necessario per creare una pasta. Nel caso dell'OPC si ha la necessità di un minor quantitativo per creare una pasta).

In questo modo, si è partiti da una pasta con lavorabilità iniziale paragonabile sia nel caso della miscela LC3 e della miscela OPC, e simile al diametro interno inferiore del tronco di cono.

Dati della miscela con OPC:

- Cemento OPC: **174.60 g**
- Rapporto acqua/legante (w/c): **0.25**
- Acqua: **43.70 g**
- Dosaggio SPs: **0.80%** sul peso del legante
- SPs: **1.40 g**

Anche in questo caso sono stati preparati **quattro campioni**, seguendo la **stessa procedura** utilizzata per i test con LC3. I risultati ottenuti sono stati **significativamente differenti**, a causa delle diverse caratteristiche derivanti dalla composizione del legante OPC rispetto al legante LC3.

1. Reference (senza superfluidificante)



2. Campione con SPs1



3. Campione con SPs2



4. Campione con SPs3

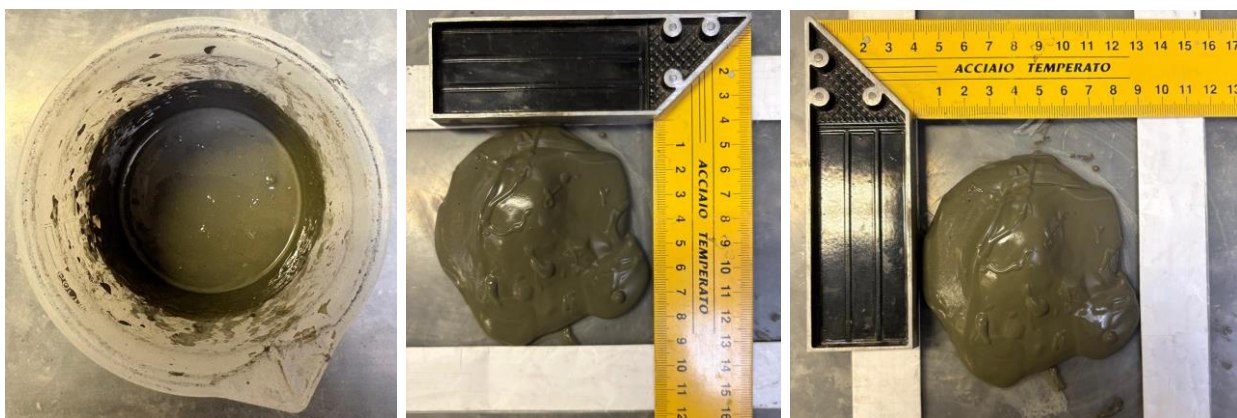


Tabella 7: Risultati OPC

DATI: OPC							
SPs	SPs % wt	SPs (g)	Binder	Binder (g)	w/b	Water (g)	Spread diameter (cm)
			OPC	174,62	0,25	43,69	5,40
SPs1	0,8	1,40	OPC	174,60	0,25	43,70	6,40
SPs2	0,8	1,39	OPC	174,59	0,25	43,71	5,90
SPs3	0,8	1,44	OPC	174,61	0,25	43,69	9,10

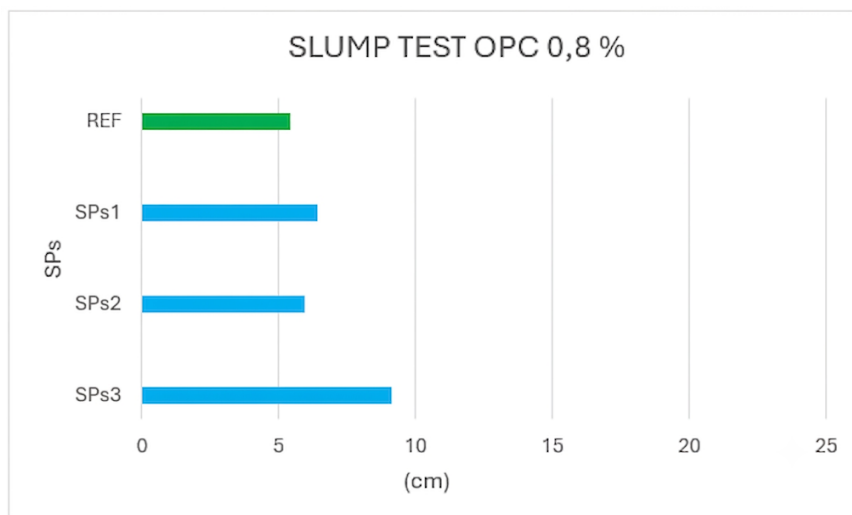


Figura 18: Confronto risultati OPC

8.2 PROVA DI CONSISTENZA ALLO STATO FRESCO

Sono state realizzate diverse miscele di malta al fine di eseguire prove di lavorabilità, con l'obiettivo di individuare il miglior rapporto acqua/legante.

Procedimento:

1. **Preparazione del campione:** Dopo aver mescolato il legante con l'inerte, si aggiungono l'acqua e il superfluidificante (SP), quindi il tutto viene miscelato per circa 5 minuti, in modo da ottenere una miscela omogenea e consentire al superfluidificante di agire correttamente.
2. **Riempimento del tronco di cono:** Si utilizza uno stampo metallico a forma di tronco di cono, posizionato al centro della tavola a scosse. Lo stampo viene riempito dall'alto, cercando di compattare il più possibile il materiale con l'ausilio di un pestello, al fine di evitare la presenza di vuoti d'aria.
3. **Rimozione dello stampo:** Si solleva lentamente e con cautela il tronco di cono verso l'alto, permettendo al materiale di assestarsi liberamente sul piatto della tavola a scosse.
4. **Scuotimento del tavolo:** Una volta rimosso lo stampo, si aziona il meccanismo che solleva e lascia cadere il piatto per 15 volte consecutive, come previsto dalla norma di riferimento.
5. **Misurazione dello spandimento (UNI EN 1015-3):** Al termine delle scosse, si misura il diametro della massa spanduta in due direzioni perpendicolari, utilizzando due listelli e un metro. La media delle due misurazioni rappresenta il valore di **spandimento medio**, dal quale si ricavano informazioni sulla **lavorabilità** e la **fluidità** della miscela.



Figura 19: tavola a scosse

Le malte sono state preparate utilizzando Cemento Portland (OPC) 52.5 N e impiegando tre diversi superfluidificanti (SPs):

- SPs1
- SPs3
- Aloe

L'obiettivo è quello di avere uno slump di circa 18 cm, quindi ottenere una malta plastica secondo le norme UNI EN 1015-3 e UNI EN 1015-6.

Esecuzione:

La prima operazione è stata la progettazione del mix design. È stato scelto un quantitativo di legante di riferimento pari a 525 g. Definito il rapporto acqua/legante, è stato quindi possibile calcolare il corrispondente quantitativo d'acqua.

Per quanto riguarda la sabbia, è stato adottato un rapporto in massa aggregato/legante pari a 3:1, per cui il quantitativo di sabbia utilizzato è stato di 1575 g.

Successivamente, tutte le masse sono state rapportate a un volume di riferimento. In questo caso, si è scelto di lavorare su un volume di 0,5 litri, pertanto tutti i quantitativi sono stati divisi per due.

Un'ulteriore considerazione importante riguarda lo stato della sabbia: non si disponeva di sabbia a superficie satura asciutta (SSA), pertanto è stato necessario correggere la massa dell'acqua tenendo conto del contenuto di umidità (u%) e della capacità di assorbimento (a%) rilevati in prove precedenti:

- Umidità (u%) = 5,93 %
- Assorbimento (a%) = 2,82 %

Infine, il super fluidificante è stato dosato allo 0,80% in massa sul legante, in linea con quanto previsto dai mini-slump test.

L'obiettivo della sperimentazione è il raggiungimento di un valore di **spandimento** pari a **18 cm**, assunto come target di riferimento per garantire un'adequata lavorabilità della miscela.

8.2.1 PROVA DI LAVORABILITÀ: OPC

Tabella 8: Mix design con **SPs3**, rapporto w/c= 0.4 e SPs%=0.80%

SPs3 OPC	Cement	Clay	Calcareous filler	Water	SSA Sand 0/6	SPs3	SP%
Mass (kg/m ³)	525	0	0	210	1575	4.20	0,8%
Density (kg/L)	3.10	2.98	2.70	1.00	2.65	1.09	Total Volume (L/m ³)
Volume (L/m ³)	169	0	0	210	594	3,85	978
Mass for 1 Liter SSA (kg/m ³)	534	0	0	214	1618	4.27	1000
Mass for 0.5 Liter SSA (kg/m ³)	267	0	0	107	809	2.14	500
Mass for 0.5 Liter HUMID (kg/m ³)	267	0	0	82	833	2.14	500

La miscela è risultata eccessivamente fluida, pertanto sarà necessario ridurre il rapporto acqua/legante (w/c).

La prova è stata ripetuta con un rapporto acqua/legante (w/c) pari a 0,3; sono stati pertanto ricalcolati tutti i parametri necessari per il mix design della malta.

Tabella 9: Mix design con **SPs3**, rapporto w/c= 0.3 e SPs%=0.80%

SPs3 OPC	Cement	Clay	Calcareous filler	Water	SSA Sand 0/6	SPs3	SP%
Mass (kg/m ³)	525	0	0	157.50	1575	4.20	0,8%
Density (kg/L)	3.10	2.98	2.70	1.00	2.65	1,09	Total Volume (L/m ³)
Volume (L/m ³)	169	0	0	158	594	3.85	925
Mass for 1 Liter SSA (kg/m ³)	563	0	0	169	1710	4.51	1000
Mass for 0.5 Liter SSA (kg/m ³)	282	0	0	84	855	2.25	500
Mass for 0.5 Liter HUMID (kg/m ³)	282	0	0	59	881	2.25	500



La prova ha fornito risultati soddisfacenti, evidenziando un diametro medio pari a circa **18 cm**. Mantenendo un rapporto acqua/cemento (w/c) pari a 0,3, è stata preparata una malta impiegando come superfluidificante il CRH.

Tabella 10: Mix design con **SPs1**, rapporto w/c= 0.3 e SPs%=0.80 %

SPs1 OPC	Cement	Clay	Calcareous filler	Water	SSA Sand 0/6	SPs1	SP%
Mass (kg/m ³)	525	0	0	157.5	1575	4.20	0,8%
Density (kg/L)	3.10	2.98	2.70	1.00	2,65	1.00	Total Volume (L/m ³)
Volume (L/m ³)	169	0	0	158	594	4.20	925
Mass for 1 Liter SSA (kg/m ³)	563	0	0	169	1710	4.50	1000
Mass for 0.5 Liter SSA (kg/m ³)	281	0	0	84	855	2.25	500
Mass for 0.5 Liter HUMID (kg/m ³)	281	0	0	59	881	2.25	500

Con un rapporto acqua/cemento (w/c) pari a 0,30, la miscela non risultava impastabile a causa dell'insufficiente quantità d'acqua. È stata pertanto aggiunta successivamente una quantità d'acqua pari a 32 g, raggiungendo un rapporto w/c di 0,42, risultato tuttavia eccessivo (**slump= 21-19.5 cm**).



È stato quindi aumentato il rapporto acqua/legante, scegliendo un valore di w/c pari a 0.35; di conseguenza, sono stati ripetuti i calcoli relativi al mix design.

Tabella 11: Mix design con **SPs1**, rapporto w/c= 0.35 e SPs%=0.80 %

SPs1 OPC	Cement	Clay	Calcareous filler	Water	SSA Sand 0/6	SPs1	SP%
Mass (kg/m ³)	525	0	0	183.75	1575	4.20	0,8%
Density (kg/L)	3.10	2.98	2.70	1.00	2,65	1.00	Total Volume (L/m ³)
Volume (L/m ³)	169	0	0	184	594	4.20	952
Mass for 1 Liter SSA (kg/m ³)	548	0	0	192	1662	4.38	1000
Mass for 0.5 Liter SSA (kg/m ³)	274	0	0	96	831	2.19	500
Mass for 0.5 Liter HUMID (kg/m ³)	274	0	0	71	856	2.19	500



L'obiettivo della prova è quello di raggiungere uno slump di circa **18 cm** (1 valore di 18 cm non è una misura casuale, ma rappresenta il valore centrale perfetto della classe di consistenza S4, fluida, che è in assoluto la più prescritta e utilizzata nelle costruzioni civili e strutturali in Italia); tuttavia, i risultati ottenuti sono stati comunque migliori rispetto alla prova precedente (**slump=15-15.5cm**). È stato quindi deciso di mantenere lo stesso rapporto acqua/legante (w/c), impiegando questa volta il superfluidificante **SPs3**.

Tabella 12: Mix design con **SPs3**, rapporto w/c= 0.35 e SPs%=0.80 %

SPs3 OPC	Cement	Clay	Calcareous filler	Water	SSA Sand 0/6	SPs3	SP%
Mass (kg/m ³)	525	0	0	183.75	1575	4.20	0,8%
Density (kg/L)	3.10	2.98	2.70	1.00	2.65	1.09	Total Volume (L/m ³)
Volume (L/m ³)	169	0	0	184	594	3.85	951
Mass for 1 Liter SSA (kg/m ³)	548	0	0	192	1662	4.39	1000
Mass for 0.5 Liter SSA (kg/m ³)	274	0	0	96	831	2.19	500
Mass for 0.5 Liter HUMID (kg/m ³)	274	0	0	71	856	2.19	500

L'impiego del superfluidificante SPs3 con un contenuto d'acqua corrispondente a un rapporto acqua/legante (w/c) pari a 0.35 risulta eccessivo. In tale condizione non è stato possibile determinare lo slump, a causa della formazione di un'eccessiva quantità di bleeding. Considerando che con un rapporto w/c di 0.30 erano stati ottenuti risultati soddisfacenti, la prova è stata ripetuta utilizzando un contenuto d'acqua pari a w/c = 0.32, al fine di valutare il comportamento della malta.

Tabella 13: Mix design con **SPs3**, rapporto w/c= 0.32 e SPs%=0.80 %

SPs3 OPC	Cement	Clay	Calcareous filler	Water	SSA Sand 0/6	SPs3	SP%
Mass (kg/m ³)	525	0	0	168	1575	4.20	0,8%
Density (kg/L)	3.10	2.98	2.70	1.00	2,65	1.09	Total Volume (L/m ³)
Volume (L/m ³)	169	0	0	168	594	3.85	936
Mass for 1 Liter SSA (kg/m ³)	557	0	0	178	1690	4.46	1000

Mass for 0.5 Liter SSA (kg/m ³)	279	0	0	89	845	2.23	500
Mass for 0.5 Liter HUMID (kg/m ³)	279	0	0	64	871	2.23	500



Anche in questo caso il rapporto acqua/legante risulta eccessivo (**slump=23.5 cm**). Pur non essendosi verificato fenomeno di bleeding, lo spandimento (slump) ottenuto è risultato comunque troppo elevato.

Considerata la limitata efficacia dei risultati ottenuti nelle prove precedenti, si è deciso di modificare l'approccio sperimentale.

Invece di mantenere costante il dosaggio del superfluidificante, si è scelto di **mantenere costante la lavorabilità**, operando quindi con dosaggi di superfluidificante differenti e mantenendo costante il rapporto acqua/legante (w/c).

Tabella 14: Mix design con **SPs1**, rapporto w/c= 0.30 e SPs%=2.80 %

SPs1 OPC	Cement	Clay	Calcareous filler	Water	SSA Sand 0/6	SPs1	SP%
Mass (kg/m ³)	525	0	0	157.50	1575	14.70	2,8%
Density (kg/L)	3.10	2.98	2.70	1.00	2,65	1,00	Total Volume (L/m ³)
Volume (L/m ³)	169	0	0	158	594	14.70	925
Mass for 1 Liter SSA (kg/m ³)	563	0	0	169	1710	15.27	1000
Mass for 0.5 Liter SSA (kg/m ³)	282	0	0	84	855	7.64	500
Mass for 0.5 Liter HUMID (kg/m ³)	282	0	0	59	881	7.64	500

La prova è stata realizzata anche utilizzando un dosaggio di superfluidificante pari al 2.40% (5.72 g di SPs1), è stato ottenuto lo stesso risultato, cioè uno slump di **15.5 cm**.



Mantenendo un rapporto acqua/legante pari a 0.30, è stato testato nuovamente un campione con l'SPs3. In questo caso abbiamo utilizzato un dosaggio di SPs pari a 0.70%.

Tabella 15: Mix design con **SPs3**, rapporto w/c= 0.30 e SPs%=0.70 %

SPs3 OPC	Cement	Clay	Calcareous filler	Water	SSA Sand 0/6	SPs3	SP%
Mass (kg/m ³)	525	0	0	157.50	1575	3.68	0,7%
Density (kg/L)	3.10	2.98	2.70	1.00	2.65	1.09	Total Volume (L/m ³)
Volume (L/m ³)	169	0	0	158	594	3.37	925
Mass for 1 Liter SSA (kg/m ³)	564	0	0	169	1710	3.95	1000
Mass for 0.5 Liter SSA (kg/m ³)	282	0	0	85	855	1.97	500
Mass for 0.5 Liter HUMID (kg/m ³)	282	0	0	59	881	1.97	500



Si può osservare che, pur impiegando dosaggi differenti per i due superfluidificanti, sono stati ottenuti risultati pressoché simili tra loro (**slump= 15cm**).

Poiché le prove preliminari condotte mantenendo costante il dosaggio del superfluidificante non hanno fornito risultati soddisfacenti, si è deciso di adottare un differente approccio sperimentale. In particolare, anziché mantenere costante il dosaggio di superfluidificante, si è scelto di mantenere costante la lavorabilità dell'impasto.

Come primo passaggio, è stato necessario definire il quantitativo d'acqua da impiegare, ovvero il rapporto acqua/cemento (w/c). A tal fine, è stato confezionato un campione preliminare con un rapporto w/c pari a 0.35. L'obiettivo del campione di riferimento (**REF**), ossia senza l'aggiunta di superfluidificanti, è quello di ottenere uno spandimento pari a **10.5 cm**.

Tabella 16: dati della prova **REF** e w/c=0.35

Cement (g)	Water (g)	Sand (g)	SP (g)	Slump (cm)
277.41	72.30	856.26	/	/

Durante la fase di miscelazione, è emerso che la quantità d'acqua inizialmente prevista non era sufficiente a garantire l'omogeneità dell'impasto, in quanto il campione risultava difficilmente lavorabile. Di conseguenza, si è proceduto ad aggiungere acqua fino a raggiungere un rapporto acqua/cemento (w/c) pari a 0,40.

Tabella 17: dati della prova **REF** e w/c= 0.40

Cement (g)	Water (g)	Sand (g)	SP (g)	Slump (cm)
277.41	86.75	856.26	/	10.5



Poiché la miscela è risultata correttamente amalgamata e ha mostrato una buona omogeneità, per i campioni successivi si è deciso di adottare un rapporto acqua/cemento (w/c) pari a 0,40.

Come primo superfluidificante è stato utilizzato l'**SPs3**. In riferimento alle prove preliminari, è stato adottato un dosaggio di superfluidificante (SP%) pari allo 0.6%.

Tabella 18: dati della prova con **SPs3**, $w/c = 0.40$ e $SP\% = 0.6\%$

Cement (g)	Water (g)	Sand (g)	SP (g)	Slump (cm)
270.02	83.07	833.75	1.68	18



Dal momento che il nostro obiettivo era ottenere uno slump di **18 cm**, possiamo affermare che, con un rapporto acqua/cemento (w/c) pari a 0.40 e un dosaggio di **SPs3** dello 0.6%, abbiamo raggiunto il risultato desiderato.

Successivamente è stato testato il secondo superfluidificante, identificato come CRH. Poiché questo additivo presenta una capacità inferiore rispetto all'**SPs3**, sulla base dei dati ottenuti dalle prove precedenti è stato scelto di adottare un dosaggio di superfluidificante (SP%) pari allo 0.8%.

Tabella 19: dati della prova con **SPs1**, $w/c = 0.40$ e $SP\% = 0.8\%$

Cement (g)	Water (g)	Sand (g)	SP (g)	Slump (cm)
270.08	83.15	833.15	2.19	19.5



Il valore di slump ottenuto risulta superiore a quello desiderato; pertanto, nei test successivi è stato previsto un dosaggio di superfluidificante leggermente ridotto.

È stato successivamente testato il terzo superfluidificante, **SPs2**.

Sulla base delle prove precedenti, che ne hanno evidenziato un'efficienza leggermente inferiore rispetto all'SPs3, la prima prova è stata condotta con un dosaggio pari allo 0.8%.

Tabella 20: dati della prova con **SPs2**, $w/c = 0.40$ e $SP\% = 0.8\%$

Cement (g)	Water (g)	Sand (g)	SP (g)	Slump (cm)
270.78	83.13	833.38	2.23	eccessivo

Con un dosaggio di superfluidificante pari allo 0.8% l'impasto è risultato troppo fluido, con uno spandimento superiore a 25 cm; pertanto, nel test successivo è stato utilizzato un dosaggio ridotto, pari allo 0.6%.

Tabella 21: dati della prova con **SPs2**, $w/c = 0.40$ e $SP\% = 0.6\%$

Cement (g)	Water (g)	Sand (g)	SP (g)	Slump (cm)
270.16	83.02	833.62	1.64	21



Anche con un dosaggio pari allo 0.6% è stato registrato uno slump eccessivo, considerando che l'obiettivo era ottenere uno spandimento di 18 cm. Pertanto, il dosaggio è stato ulteriormente ridotto, adottando un valore di $SP\%$ pari a 0.4%.

Tabella 22: dati della prova con **SPs2**, $w/c = 0.40$ e $SP\% = 0.4\%$

Cement (g)	Water (g)	Sand (g)	SP (g)	Slump (cm)
270.37	83.15	833.37	1.08	16.5



Come si può osservare, in questo caso lo spandimento risulta inferiore rispetto al valore obiettivo; di conseguenza, per ottenere un risultato ottimale è necessario adottare un dosaggio di superfluidificante superiore allo 0.4%, ma inferiore allo 0.6%.

La seguente prova è stata condotta senza l'utilizzo di superfluidificanti, **aumentando il contenuto d'acqua** per analizzare la variazione delle caratteristiche della malta. L'aggiunta d'acqua è proseguita fino al raggiungimento di uno slump di 18 cm.

Tabella 23: dati della prova con $w/c = 0.55$

Cement (g)	Water (g)	Sand (g)	SP (g)	Slump (cm)
270.24	83.46+40.71	833.37	/	18



Tabella 24: dati della prima prova OPC con **Aloe Arborescens** al 10% e $w/c=0.40$

Cemento (g)	Low-grade Calcined Clay (g)	Calcareus filler (g)	Water (g)	Sand (g)	Aloe (g)	Slump (cm)
270.25	/	/	35.08	833.83	75.05	18



8.2.2 PROVA DI LAVORABILITÀ: LC3

Le stesse prove precedentemente eseguite sull'OPC (cemento Portland 52.5 N) sono state ripetute sull'LC3.

L'obiettivo era ottenere una lavorabilità comparabile a quella delle prove condotte con il solo cemento. Per questo motivo, la prima prova effettuata è stata quella di riferimento, cioè senza l'impiego di superfluidificanti.

Nella prova iniziale è stato adottato un rapporto acqua/legante $w/c = 0,50$. Poiché è stato utilizzato un altro sacco di sabbia (il numero 3), caratterizzato da un'umidità $u\% = 5.02\%$, sono state applicate tutte le necessarie correzioni per il calcolo del quantitativo effettivo di acqua da aggiungere.

Tabella 25: dati della prova **REF** e $w/c=0.50$

Cemento (g)	Low-grade Calcined Clay (g)	Calcareus filler (g)	Water (g)	Sand (g)	SP (g)	Slump (cm)
127.25	84.02	43.44	111.10	779.70	/	13



Poiché nella prova di riferimento eseguita con il cemento era stato ottenuto uno **slump** pari a **10.5 cm**, è necessario perseguire lo stesso livello di lavorabilità anche per la miscela LC3. A tal fine, il rapporto acqua/legante è stato ridotto, adottando un valore **a/c = 0.40**.

Tabella 26: dati della prova **REF** e $w/c=0.40$

Cemento (g)	Low-grade Calcined Clay (g)	Calcareous filler (g)	Water (g)	Sand (g)	SP (g)	Slump (cm)
130.16	86.22	44.23	87.33	799.14	/	10.5



Poiché è stato ottenuto lo stesso spandimento della prova di riferimento eseguita con il cemento, si procederà alla realizzazione dei campioni adottando un rapporto acqua/legante **a/c = 0.40**.

A questo punto vengono introdotti i diversi superfluidificanti; il primo a essere testato è **SPs3**. Sulla base dei risultati ottenuti nelle prove condotte con il cemento, è stato scelto un dosaggio di **SPs3 pari allo 0.7%**.

Tabella 27: dati della prova con **SPs3**, $w/c= 0.40$

Cemento (g)	Low-grade Calcined Clay (g)	Calcareous filler (g)	Water (g)	Sand (g)	SP (g)	Slump (cm)
134.75	88.23	46.18	90.15	821.37	1.87	17.5



Poiché il nostro obiettivo è ottenere uno spandimento pari a **18 cm**, il risultato ottenuto può essere considerato soddisfacente.

Si procede quindi con la prova del secondo superfluidificante, **SPs3**. Sulla base dei risultati della prova precedente, è stato adottato un dosaggio di **SP% = 0.8%**.

Tabella 28: dati della prova con **SPs3**, w/c= 0.40 e SP%=0.8%

Cemento (g)	Low-grade CC (g)	Calcareus filler (g)	Water (g)	Sand (g)	SP (g)	Slump (cm)
134.17	88.15	46.14	90.00	821.20	2.15	23



Con un dosaggio pari allo **0.8%** si è ottenuto uno spandimento eccessivo; pertanto, il dosaggio del superfluidificante è stato ridotto, adottando un valore di **SP% = 0.6%**.

Tabella 29: dati della prova con **SPs3**, w/c= 0.40 e SP%=0.6%

Cemento (g)	Low-grade Calcined Clay (g)	Calcareus filler (g)	Water (g)	Sand (g)	SP (g)	Slump (cm)
134.06	88.14	46.23	90.06	821.47	1.61	19.5



Valutando il risultato ottenuto, per raggiungere prestazioni ottimali è necessario ridurre il dosaggio del superfluidificante di alcuni punti percentuali. Si procede quindi con la prova dell'ultimo superfluidificante, **l'unico specificamente sviluppato per il sistema LC3, ossia SPs2.**

Anche in questo caso, sulla base dei risultati ottenuti nelle prove condotte sull'OPC, è stato scelto un dosaggio pari allo **0.5%**.

Tabella 30: dati della prova con **SPs2**, $w/c = 0.40$ e $SP\% = 0.5\%$

Cemento (g)	Low-grade Calcined Clay (g)	Calcareus filler (g)	Water (g)	Sand (g)	SP (g)	Slump (cm)
134.47	88.14	46.08	90.22	821.11	1.36	/

Durante la fase di impasto della malta ci siamo resi conto che il materiale risultava adeguatamente lavorabile anche con un dosaggio inferiore allo 0.5%. Di conseguenza, abbiamo utilizzato una quantità minore, pari allo 0.44%.

Tabella 31: dati della prova con **SPs2**, $w/c = 0.40$ e $SP\% = 0.44\%$

Cemento (g)	Low-grade Calcined Clay (g)	Calcareus filler (g)	Water (g)	Sand (g)	SP (g)	Slump (cm)
134.47	88.14	46.08	90.22	821.11	1.18	21

Poiché uno spandimento di 21 cm risulta eccessivo, abbiamo proseguito l'impasto per un ulteriore minuto, ottenendo uno slump di 19.5 cm.

Pertanto, per raggiungere uno spandimento più vicino al nostro obiettivo sarà necessario ridurre ulteriormente il dosaggio.



Come già fatto per l'OPC, è stato realizzato un campione senza l'impiego di superfluidificanti, aumentando invece il contenuto d'acqua al fine di verificare come variano le caratteristiche meccaniche della malta. Inizialmente è stato aggiunto lo stesso quantitativo d'acqua utilizzato nelle prove precedenti, corrispondente a un rapporto $w/c = 0.40$.

Successivamente, l'acqua è stata incrementata gradualmente fino a raggiungere lo slump desiderato, ottenendo così un rapporto **w/c pari a 0.46**.

Tabella 32: dati della prova con $w/c = 0.56$

Cemento (g)	Low-grade Calcined Clay (g)	Calcareous filler (g)	Water (g)	Sand (g)	SP (g)	Slump (cm)
134.19	88.60	46.02	133.82	821.28	/	18



Come ultime prove abbiamo deciso di utilizzare **l'aloe arborescens**, considerata un superfluidificante naturale. L'approccio iniziale non è stato semplice, poiché l'aloe presenta un elevato contenuto d'acqua (64.15%); è stato quindi necessario effettuare le opportune correzioni per mantenere costante il rapporto w/c pari a 0.40.

Di conseguenza, sono stati realizzati diversi campioni al fine di individuare il corretto dosaggio di principio attivo (ovvero la percentuale di aloe al netto dell'acqua).

Tabella 33: dati della prima prova di Aloe

Cemento (g)	Low-grade Calcined Clay (g)	Calcareus filler (g)	Water (g)	Sand (g)	Aloe (g)	Slump (cm)
134.64	88.04	46.06	4.21	821.87	115.02	18



Inizialmente abbiamo raggiunto lo spandimento desiderato utilizzando un dosaggio di principio attivo pari al 15%; tuttavia, il rapporto w/c risultante era pari a 0.35, mentre il valore richiesto deve rimanere costante e pari a 0.40.

Di conseguenza, è stato necessario correggere il quantitativo d'acqua, ottenendo un dosaggio di **principio attivo di aloe Arborescens** pari al 10%.

Tabella 34: dati della prima prova con Aloe Arborescens al 10% e w/c=0.40

Cemento (g)	Low-grade Calcined Clay (g)	Calcareus filler (g)	Water (g)	Sand (g)	Aloe (g)	Slump (cm)
134.04	88.48	46.48	42.40	821.03	74.19	18



A questo punto abbiamo ottenuto il nostro obiettivo mantenendo il rapporto w/c richiesto.

9 TEST DELLA RITENZIONE DELLA LAVORABILITÀ AL VARIARE DELLA TEMPERATURA AMBIENTALE

Definiti i dosaggi ottimali di additivo e i mix design delle malte a base di OPC e LC3, è stata valutata l'evoluzione della lavorabilità nel tempo per le malte confezionate con cemento Portland ordinario e con cemento LC3.

La sperimentazione ha previsto l'esecuzione di prove di spandimento mediante tavola a scosse a tre differenti regimi termici: **5 °C**, **20 °C** e **40 °C**, per simulare un clima rigido, un clima temperato e un clima torrido, rispettivamente.

Per il condizionamento termico dei campioni sono stati utilizzati, rispettivamente: un **frigorifero** per la prova a **5 °C**, una **camera climatica** impostata a una temperatura di **20 °C** e con **un'umidità relativa del 50%**, e un **forno** per la prova a **40 °C**.

Per ogni miscela, la misura del diametro interno di spandimento è stata ripetuta a intervalli di **10 minuti**, al fine di monitorare la perdita di fluidità nel tempo (*slump loss*).

La prova è stata considerata conclusa nel momento in cui lo spandimento ha raggiunto il valore di 10 cm, corrispondente al diametro della base del tronco di cono impiegato; tale condizione identifica l'annullamento della fluidità indotta e il raggiungimento del limite di lavorabilità.

In tale contesto, l'additivo più performante è stato identificato in base alla capacità di **mantenimento della lavorabilità** (*slump retention*), ovvero quello in grado di protrarre per il maggior tempo possibile uno spandimento superiore alla soglia critica dei 10 cm.

9.1 MIX DESIGN DELLE MISCELE PER UNITA' DI VOLUME (1 LITRO)

Nelle successive fasi della sperimentazione non è stato possibile impiegare l'intera gamma dei tre superfluidificanti (SPs1, SPs2 e SPs3).

Poiché l'additivo SPs3 non risulta più reperibile in commercio, si è scelto di escluderlo dallo studio; ciò al fine di evitare lo sviluppo di miscele non replicabili su scala industriale o in future attività di ricerca a causa della mancata disponibilità del materiale.

La ricerca si è concentrata sull'utilizzo di superfluidificanti convenzionali per verificare come additivi non specifici influenzino le proprietà di entrambe le matrici cementizie.

Tabella 35: Mix design delle miscele per unità di volume (1 L) - OPC REF

OPC REF		
INPUT Parametri		
Vbinder + water	0.350	L
w/c	0.40	-
SP	0	%
Composizione binder		
Componente	% in peso	Densità (g/cm³)
OPC	100.0	3.100
Calcined Clay	0.0	2.980
Calcareus filler	0.0	2.700
Binder	100%	3.100
	g	L
Massa Binder	484.4	156.25
Grammi per il getto		
Componente	g	L
OPC	484.4	156.25
Calcined Clay	0.00	0.00
Calcareus filler	0.00	0.00
Water	193.8	193.75
Aggregato (malta)		
a/l ρ_s (g/cm³)	2.00	2.650
Umidità aggregato u	0.0%	%
Sabbia secca (SSS)	968.75	0.366
Sabbia lorda (pesare)	968.75	0.366
H ₂ O nell'aggregato	0.00	-
H ₂ O pasta (da binder)	193.75	193.750
H ₂ O netta (pesare)	193.75	193.750
H ₂ O tot impasto	193.75	-
TOT	678.1	0.350
SP	0.00	
TOT malta	1646.88	0.716
a/l calcolato	2.000	
w/c calcolato	0.400	
Densità malta (kg/m³)	2301	

Tabella 36: Mix design delle miscele per unità di volume (1 L) – OPC+H2O

OPC +H2O		
INPUT Parametri		
Vbinder + water	0.350	L
w/c	0.55	-
SP	0	%
Composizione binder		
Componente	% in peso	Densità (g/cm³)
OPC	100.0	3.100
Calcined Clay	0.0	2.980
Calcareus filler	0.0	2.700
Binder	100%	3.100
	g	L
Massa Binder	401.1	129.39
Grammi per il getto		
Componente	g	L
OPC	401.1	129.39
Calcined Clay	0.0	0.00
Calcareus filler	0.0	0.00
Acqua	220.6	220.61
Aggregato (malta)		
a/l ρ_s (g/cm³)	2.00	2.650
Umidità aggregato u	0.0%	%
Sabbia secca (SSS)	802.22	0.303
Sabbia lorda (pesare)	802.22	0.303
H ₂ O nell'aggregato	0.00	-
H ₂ O pasta (da binder)	220.61	220.610
H ₂ O netta (pesare)	220.61	220.610
H ₂ O tot impasto	220.61	-
TOT	621.7	
SP	0.0	
TOT malta	1423.94	0.653
a/l calcolato	2.000	
w/c calcolato	0.550	
Densità malta (kg/m³)	2182	

Tabella 37: Mix design delle miscele per unità di volume (1 L) – OPC+SPs1

OPC + SPs1		
INPUT Parametri		
Vbinder + water	0.350	L
w/c	0.40	-
SP	0.5	%
Composizione binder		
Componente	% in peso	Densità (g/cm³)
OPC	100.0	3.100
Calcined Clay	0.0	2.980
Calcareus filler	0.0	2.700
Binder	100%	3.100
	g	L
Massa Binder	484.4	156.25
Grammi per il getto		
Componente	g	L
OPC	484.4	156.25
Calcined Clay	0.0	0.00
Calcareus filler	0.0	0.00
Water	193.8	193.75
Aggregato (malta)		
a/l ρ_s (g/cm³)	2.00	2.650
Umidità aggregato u	0.0%	%
Sabbia secca (SSS)	968.75	0.366
Sabbia lorda (pesare)	968.75	0.366
H ₂ O nell'aggregato	0.00	-
H ₂ O pasta (da binder)	193.75	193.750
H ₂ O netta (pesare)	193.75	193.750
H ₂ O tot impasto	193.75	-
TOT	678.1	0.350
SP	2.4	
TOT malta	1649.30	0.716
a/l calcolato	2.000	
w/c calcolato	0.400	
Densità malta (kg/m³)	2305	

Tabella 38: Mix design delle miscele per unità di volume (1 L) – OPC+SPs2

OPC + SPs2		
INPUT Parametri		
Vbinder + water	0.350	L
w/c	0.40	-
SP	0.3	%
Composizione binder		
Componente	% in peso	Densità (g/cm³)
OPC	100.0	3.100
Calcined Clay	0.0	2.980
Calcareus filler	0.0	2.700
Binder	100%	3.100
	g	L
Massa Binder	484.4	156.25
Grammi per il getto		
Componente	g	L
OPC	484.4	156.25
Calcined Clay	0.0	0.00
Calcareus filler	0.0	0.00
Water	193.8	193.75
Aggregato (malta)		
a/l ρ_s (g/cm³)	2.00	2.650
Umidità aggregato u	0.0%	%
Sabbia secca (SSS)	968.75	0.366
Sabbia lorda (pesare)	968.75	0.366
H ₂ O nell'aggregato	0.00	-
H ₂ O pasta (da binder)	193.75	193.750
H ₂ O netta (pesare)	193.75	193.750
H ₂ O tot impasto	193.75	-
TOT	678.1	0.350
SP	1.5	
TOT malta	1648.33	0.716
a/l calcolato	2.000	
w/c calcolato	0.400	
Densità malta (kg/m³)	2304	

Tabella 39: Mix design delle miscele per unità di volume (1 L) – OPC+ALOE ARBORESCENS

OPC + ALOE		
INPUT Parametri		
Vbinder + water	0.350	L
w/c	0.40	-
SP	10	%
Composizione binder		
Componente	% in peso	Densità (g/cm³)
OPC	100.0	3.100
Calcined Clay	0.0	2.980
Calcareus filler	0.0	2.700
Binder	100%	3.100
	g	L
Massa Binder	484.4	156.25
Grammi per il getto		
Componente	g	L
OPC	484.4	156.25
Calcined Clay	0.0	0.00
Calcareus filler	0.0	0.00
Water	193.8	193.75
Aggregato (malta)		
a/l ρ_s (g/cm³)	2.00	2.650
Umidità aggregato u	0.0%	%
Sabbia secca (SSS)	968.75	0.366
Sabbia lorda (pesare)	968.75	0.366
H ₂ O nell'aggregato	0.00	-
H ₂ O pasta (da binder)	193.75	193.750
H ₂ O netta (pesare)	193.75	193.750
H ₂ O tot impasto	193.75	-
TOT	678.1	0.350
SP	48.44	
TOT malta	1695.31	0.716
a/l calcolato	2.000	
w/c calcolato	0.400	
Densità malta (kg/m³)	2369	

86.12	H2O
48.44	Principio Attivo
48.44:36=x:64	
107.6	H2O-H2OAloe
134.6	TOT ALOE

Tabella 40: Mix design delle miscele per unità di volume (1 L) – LC3 REF

LC3 REF		
INPUT Parametri		
Vbinder + water	1.0	L
w/c	0.40	-
SP	0	%
Composizione binder		
Componente	% in peso	Densità (g/cm³)
OPC	50.0	3.100
Calcined Clay	33.0	2.980
Calcareus clinker	17.0	2.700
Binder	100%	2.985
	g	L
Massa Binder	1360.56	455.78
Grammi per il getto		
Componente	g	L
OPC	680.3	219.45
Calcined Clay	449.0	150.67
Calcareus clinker	231.3	85.66
Water	544.2	544.22
Aggregato (malta)		
a/l ρ_c (g/cm³)	2.00	2.650
Umidità aggregato u	0.0%	%
Sabbia secca (SSS)	2721.12	1.027
Sabbia lorda (pesare)	2721.12	1.027
H ₂ O nell'aggregato	0.00	-
H ₂ O pasta (da binder)	544.22	544.224
H ₂ O netta (pesare)	544.22	544.224
H ₂ O tot impasto	544.22	-
TOT	1904.78	1.000
SP	0.00	
TOT malta	4625.90	2.027
a/l calcolato	2.000	
w/c calcolato	0.400	
Densità malta (kg/m³)	2282	

Tabella 41: Mix design delle miscele per unità di volume (1 L) – LC3+H2O

LC3 +H2O		
INPUT Parametri		
Vbinder + acqua	1.0	L
w/c	0.55	-
SP	0	%
Composizione binder		
Componente	% in peso	Densità (g/cm³)
OPC	50.0	3.100
Calcined Clay	33.0	2.980
Calcareus clinker	17.0	2.700
Binder	100%	2.985
	g	L
Massa Binder	1129.95	378.53
Grammi per il getto		
Componente	g	L
OPC	565.0	182.25
Calcined Clay	372.9	125.13
Calcareus clinker	192.1	71.15
Water	621.5	621.47
Aggregato (malta)		
a/l ρ_s (g/cm³)	2.00	2.650
Umidità aggregato u	0.0%	%
Sabbia secca (SSS)	2259.91	0.853
Sabbia lorda (pesare)	2259.91	0.853
H ₂ O nell'aggregato	0.00	-
H ₂ O pasta (da binder)	621.47	621.475
H ₂ O netta (pesare)	621.47	621.475
H ₂ O tot impasto	621.47	-
TOT	1751.43	1.000
SP	0.00	
TOT malta	4011.34	1.853
a/l calcolato	2.000	
w/c calcolato	0.550	
Densità malta (kg/m³)	2165	

Tabella 42: Mix design delle miscele per unità di volume (1 L) – LC3+SPs1

LC3 + SPs1		
INPUT Parametri		
Vbinder + water	1.0	L
w/c	0.40	-
SP	0.35	%
Composizione binder		
Componente	% in peso	Densità (g/cm³)
OPC	50.0	3.100
Calcined Clay	33.0	2.980
Calcareus clinker	17.0	2.700
Binder	100%	2.985
	g	L
Massa Binder	1360.56	455.78
Grammi per il getto		
Componente	g	L
OPC	680.3	219.45
Calcined Clay	449.0	150.67
Calcareus clinker	231.3	85.66
Water	544.2	544.22
Aggregato (malta)		
a/l ρ_c (g/cm³)	2.00	2.650
Umidità aggregato u	0.0%	%
Sabbia secca (SSS)	2721.12	1.027
Sabbia lorda (pesare)	2721.12	1.027
H ₂ O nell'aggregato	0.00	-
H ₂ O pasta (da binder)	544.22	544.224
H ₂ O netta (pesare)	544.22	544.224
H ₂ O tot impasto	544.22	-
TOT	1904.78	1.000
SP	4.8	
TOT malta	4630.67	2.027
a/l calcolato	2.000	
w/c calcolato	0.400	
Densità malta (kg/m³)	2285	

Tabella 43: Mix design delle miscele per unità di volume (1 L) – LC3+SPs2

LC3 + SPs2		
INPUT Parametri		
Vbinder + water	1.0	L
w/c	0.40	-
SP	0.3	%
Composizione binder		
Componente	% in peso	Densità (g/cm³)
OPC	50.0	3.100
Calcined Clay	33.0	2.980
Calcareus clinker	17.0	2.700
Binder	100%	2.985
	g	L
Massa Binder	1360.56	455.78
Grammi per il getto		
Componente	g	L
OPC	680.3	219.45
Calcined Clay	449.0	150.67
Calcareus clinker	231.3	85.66
Water	544.2	544.22
Aggregato (malta)		
a/l ρ_s (g/cm³)	2.00	2.650
Umidità aggregato u	0.0%	%
Sabbia secca (SSS)	2721.12	1.027
Sabbia lorda (pesare)	2721.12	1.027
H ₂ O nell'aggregato	0.00	-
H ₂ O pasta (da binder)	544.22	544.224
H ₂ O netta (pesare)	544.22	544.224
H ₂ O tot impasto	544.22	-
TOT	1904.78	1.000
SP	4.1	
TOT malta	4629.99	2.027
a/l calcolato	2.000	
w/c calcolato	0.400	
Densità malta (kg/m³)	2284	

Tabella 44: Mix design delle miscele per unità di volume (1 L) – LC3+Aloe

LC3 + ALOE		
INPUT Parametri		
Vbinder + water	1.0	L
w/c	0.40	-
SP	10	%
Composizione binder		
Componente	% in peso	Densità (g/cm³)
OPC	50.0	3.100
Calcined Clay	33.0	2.980
Calcareus clinker	17.0	2.700
Binder	100%	2.985
	g	L
Massa Binder	1360.56	455.78
Grammi per il getto		
Componente	g	L
OPC	680.3	219.45
Calcined Clay	449.0	150.67
Calcareus clinker	231.3	85.66
Water	544.2	544.22
Aggregato (malta)		
a/l ρ_s (g/cm³)	2.00	2.650
Umidità aggregato u	0.0%	%
Sabbia secca (SSS)	2721.12	1.027
Sabbia lorda (pesare)	2721.12	1.027
H ₂ O nell'aggregato	0.00	-
H ₂ O pasta (da binder)	544.22	544.224
H ₂ O netta (pesare)	544.22	544.224
H ₂ O tot impasto	544.22	-
TOT	1904.8	1.000
SP	136.1	
TOT malta	4761.96	2.027
a/l calcolato	2.000	
w/c calcolato	0.400	
Densità malta (kg/m³)	2349	

241.9	H2O Aloe
136.1	Principio Attivo
302.3	H2O-H2OAloe
377.9	TOT ALOE

9.2 PROVE DI LAVORABILITÀ: CEMENTO PORTLAND

Tabella 45: risultati slump test **OPC REF**

OPC												
tempo (min)	5 °C				20 °C				40 °C			
	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)
0	124	124	124,0	0,0	124	124	124,0	0,0	124	124	124,0	0,0
10	113	113	113,0	0,0	113	114	113,5	0,7	112	110	111,0	1,4
20	112	110	111,0	1,4	110	108	109,0	1,4	100	100	100,0	0,0
30	103	101	102,0	1,4	101	101	101,0	0,0				
40	102	102	102,0	0,0	100	100	100,0	0,0				
50	100	100	100,0	0,0								
60												
70												
80												
90												
100												
110												
120												

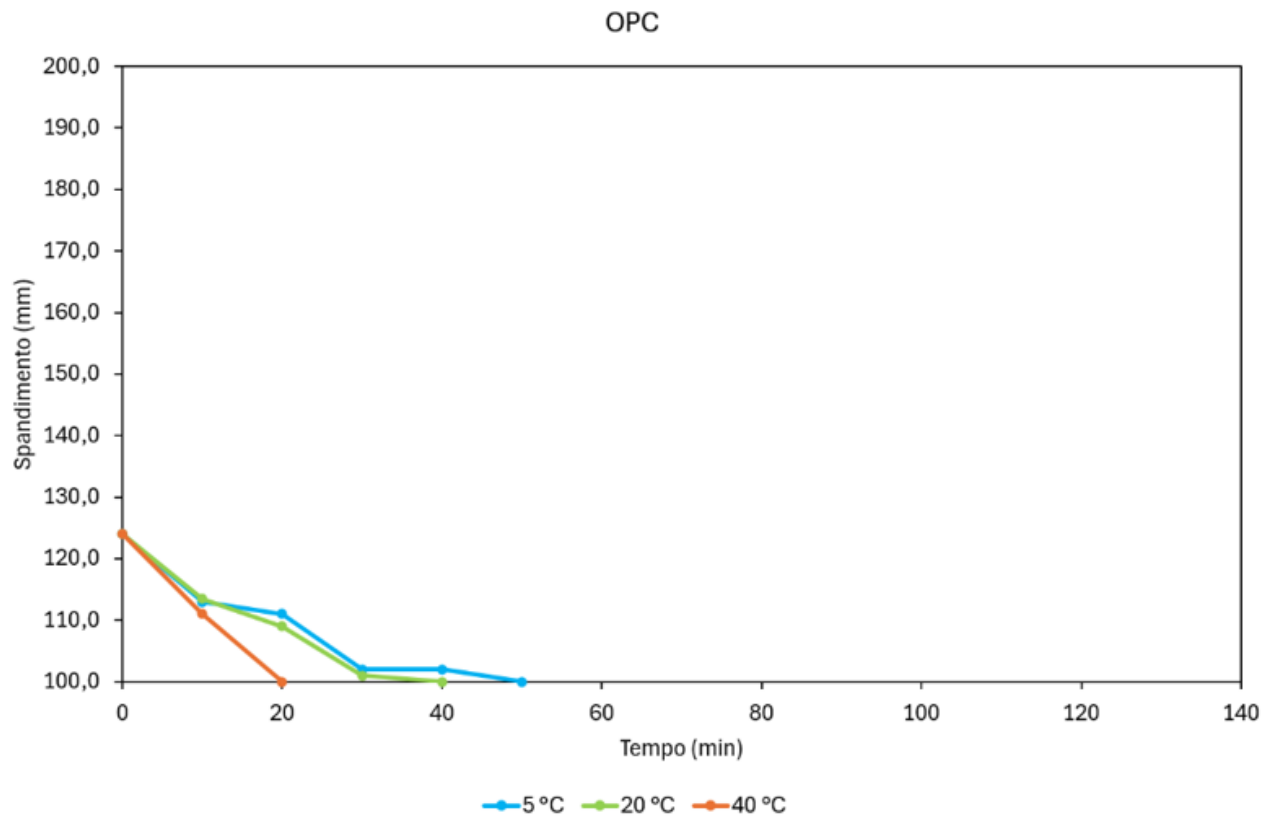


Figura 20: grafico spandimento-tempo OPC REF

Tabella 46: risultati slump test **OPC H₂O**

OPC H ₂ O												
tempo (min)	5 °C				20 °C				40 °C			
	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)
0	178	178	178,0	0,0	178	178	178,0	0,0	178	178	178,0	0,0
10	161	160	160,5	0,7	160	159	159,5	0,7	154	150	152,0	2,8
20	140	150	145,0	7,1	145	145	145,0	0,0	135	130	132,5	3,5
30	138	140	139,0	1,4	137	130	133,5	4,9	120	120	120,0	0,0
40	123	130	126,5	4,9	130	125	127,5	3,5	111	114	112,5	2,1
50	120	118	119,0	1,4	120	122	121,0	1,4	108	110	109,0	1,4
60	115	113	114,0	1,4	115	118	116,5	2,1	102	100	101,0	1,4
70	113	110	111,5	2,1	110	108	109,0	1,4	100	100	100,0	0,0
80	107	108	107,5	0,7	104	108	106,0	2,8				
90	105	100	102,5	3,5	101	103	102,0	1,4				
100	100	100	100,0	0,0	100	100	100,0	0,0				
110												
120												

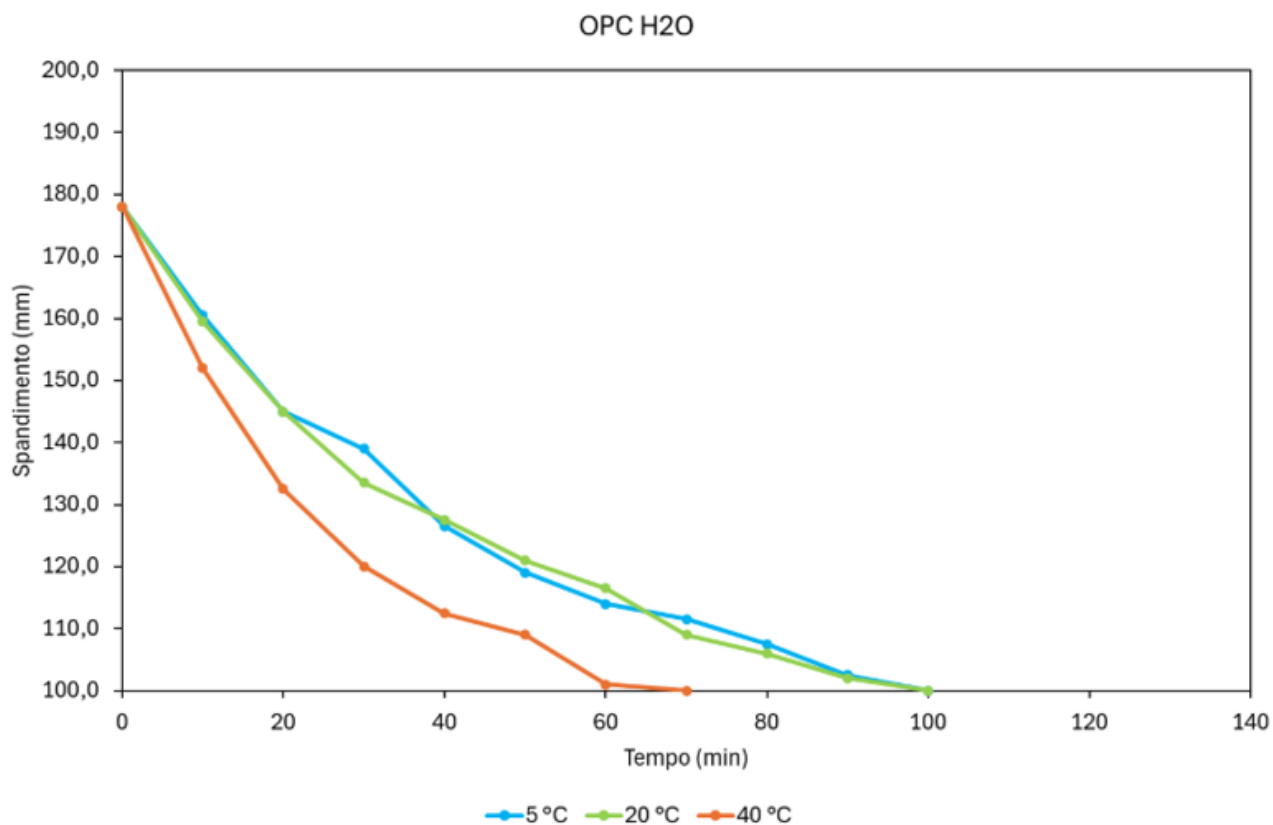


Figura 21: grafico spandimento-tempo OPC H₂O

Tabella 47: risultati slump test **OPC SPs1**

OPC SPs1												
tempo (min)	5 °C				20 °C				40 °C			
	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)
0	180	180	180,0	0,0	180	180	180,0	0,0	180	180	180,0	0,0
10	174	176	175,0	1,4	156	160	158,0	2,8	163	165	164,0	1,4
20	165	175	170,0	7,1	150	150	150,0	0,0	156	160	158,0	2,8
30	155	165	160,0	7,1	138	142	140,0	2,8	133	137	135,0	2,8
40	154	154	154,0	0,0	129	127	128,0	1,4	125	127	126,0	1,4
50	153	151	152,0	1,4	125	127	126,0	1,4	124	128	126,0	2,8
60	127	133	130,0	4,2	114	118	116,0	2,8	112	110	111,0	1,4
70	124	128	126,0	2,8	105	111	108,0	4,2	109	105	107,0	2,8
80	117	119	118,0	1,4	105	107	106,0	1,4	100	100	100,0	0,0
90	114	116	115,0	1,4	100	100	100,0	0,0				
100	110	110	110,0	0,0								
110	108	102	105,0	4,2								
120	100	100	100,0	0,0								

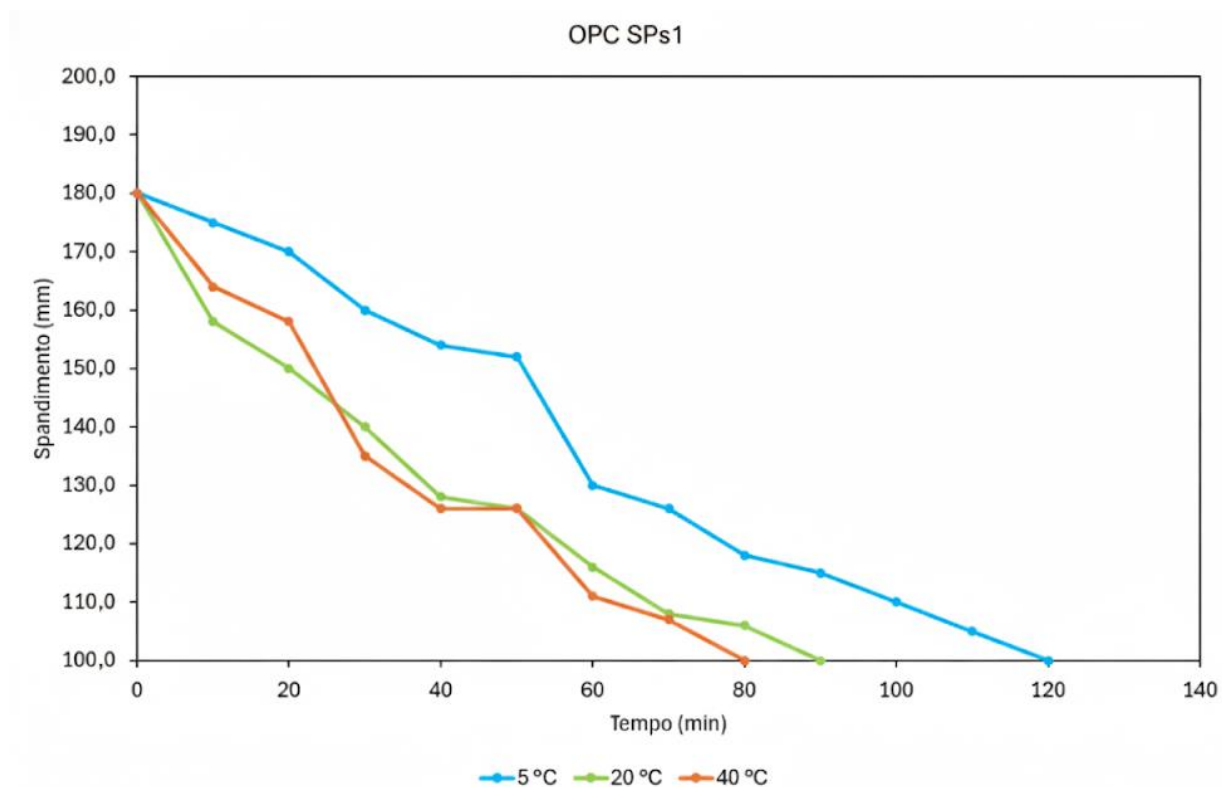


Figura 22: grafico spandimento-tempo OPC SPs1

Tabella 48: risultati slump test **OPC SPs2**

OPC SPs2												
tempo (min)	5 °C				20 °C				40 °C			
	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)
0	178	182	180,0	2,8	178	182	180,0	2,8	178	182	180,0	2,8
10	130	129	129,5	0,7	128	133	130,5	3,5	130	134	132,0	2,8
20	122	124	123,0	1,4	125	119	122,0	4,2	120	118	119,0	1,4
30	112	113	112,5	0,7	110	115	112,5	3,5	110	112	111,0	1,4
40	110	108	109,0	1,4	108	104	106,0	2,8	100	101	100,5	0,7
50	110	104	107,0	4,2	100	101	100,5	0,7	100	100	100,0	0,0
60	101	101	101,0	0,0	100	100	100,0	0,0				
70	100	100	100,0	0,0								
80												
90												
100												
110												
120												

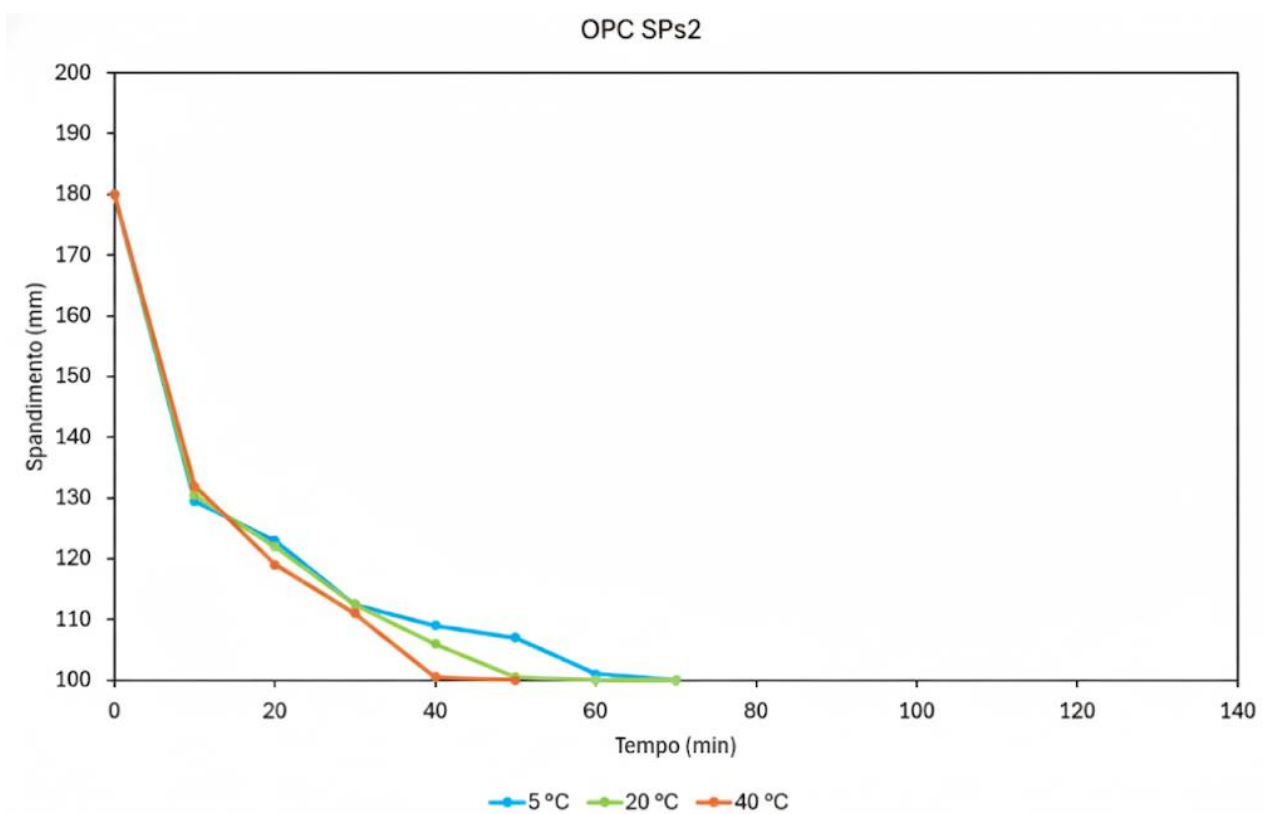


Figura 23: grafico spandimento-tempo OPC SPs2

Tabella 49: risultati slump test **OPC Aloe**

OPC ALOE												
tempo (min)	5 °C				20 °C				40 °C			
	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)
0	185	175	180,0	7,1	185	175	180,0	7,1	185	175	180,0	7,1
10	161	156	158,5	3,5	170	165	167,5	3,5	153	147	150,0	4,2
20	140	145	142,5	3,5	154	156	155,0	1,4	137	138	137,5	0,7
30	130	132	131,0	1,4	140	140	140,0	0,0	128	124	126,0	2,8
40	130	127	128,5	2,1	126	132	129,0	4,2	118	124	121,0	4,2
50	128	124	126,0	2,8	126	124	125,0	1,4	112	115	113,5	2,1
60	127	123	125,0	2,8	122	120	121,0	1,4	109	107	108,0	1,4
70	120	126	123,0	4,2	120	116	118,0	2,8	102	100	101,0	1,4
80	118	115	116,5	2,1	115	113	114,0	1,4	100	100	100,0	0,0
90	110	112	111,0	1,4	101	100	100,5	0,7				
100	100	102	101,0	1,4	100	100	100,0	0,0				
110	100	100	100,0	0,0								
120												

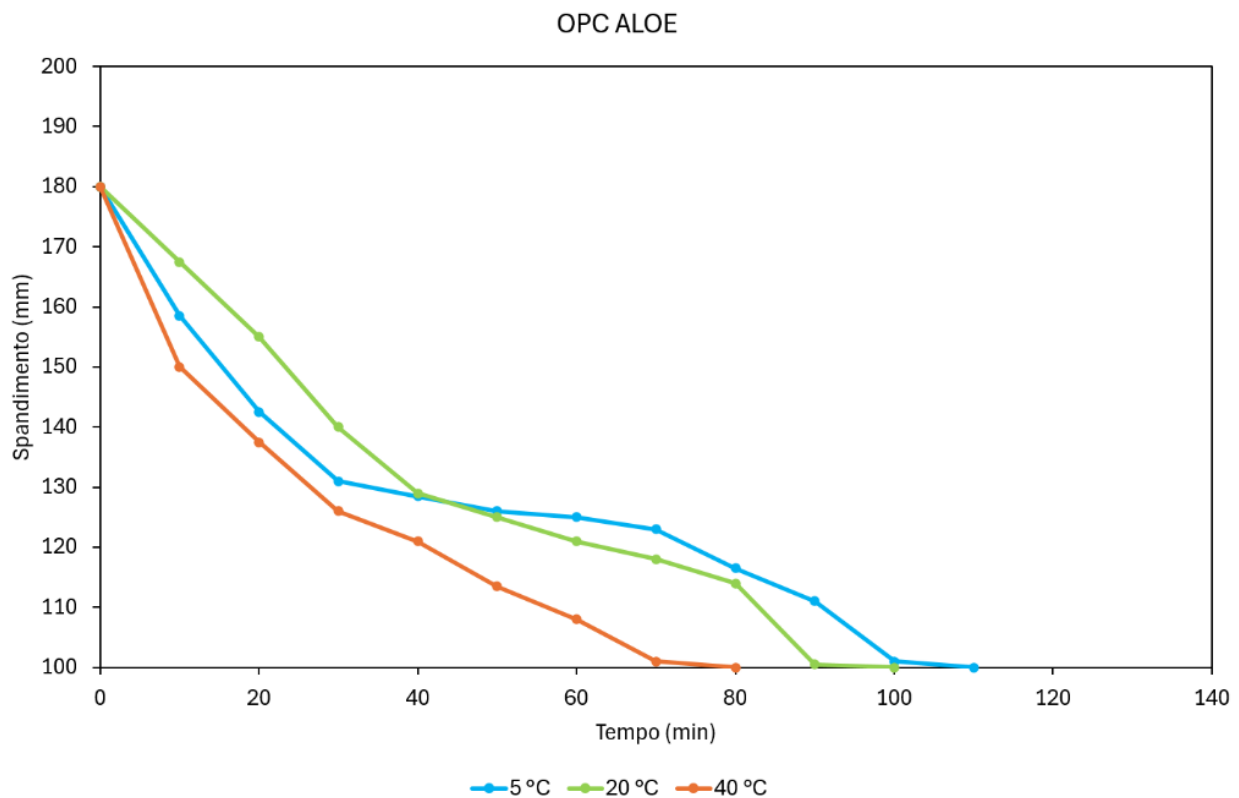


Figura 24: grafico spandimento-tempo OPC Aloe

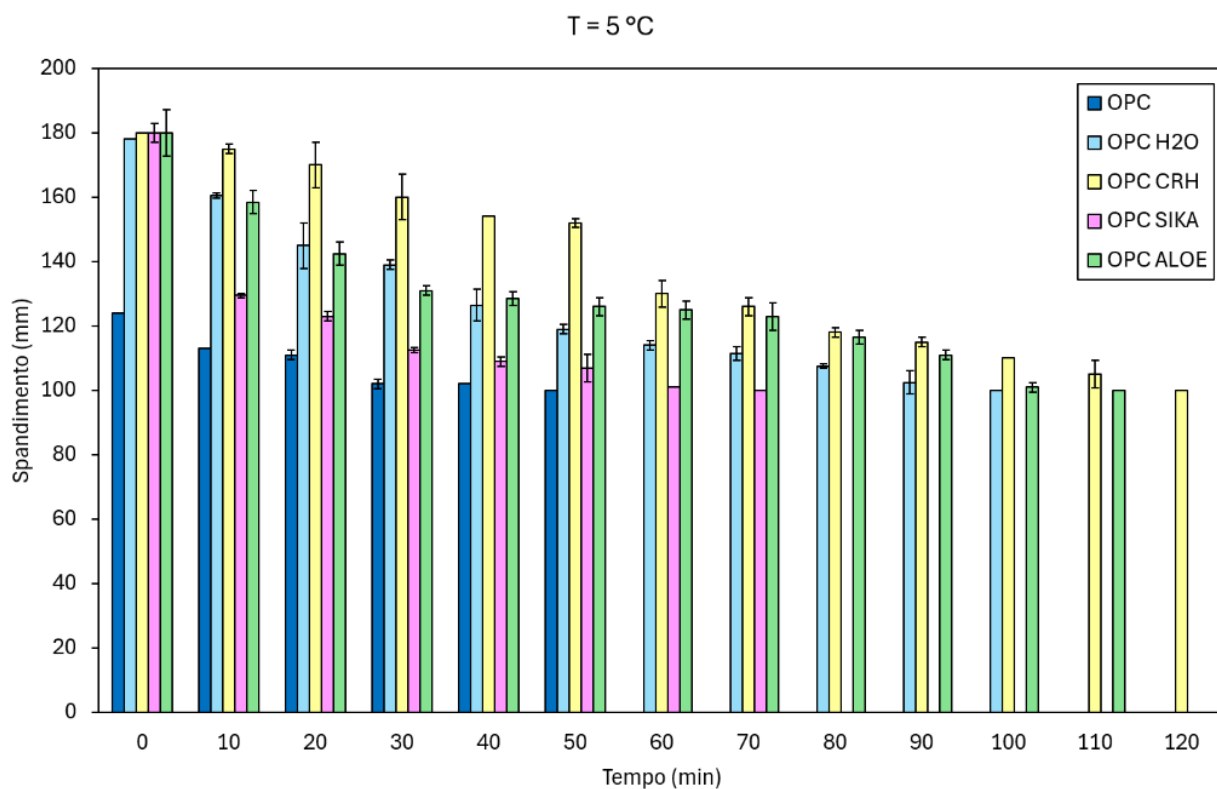


Figura 25: grafico spandimento-tempo di tutte le malte OPC a 5°C

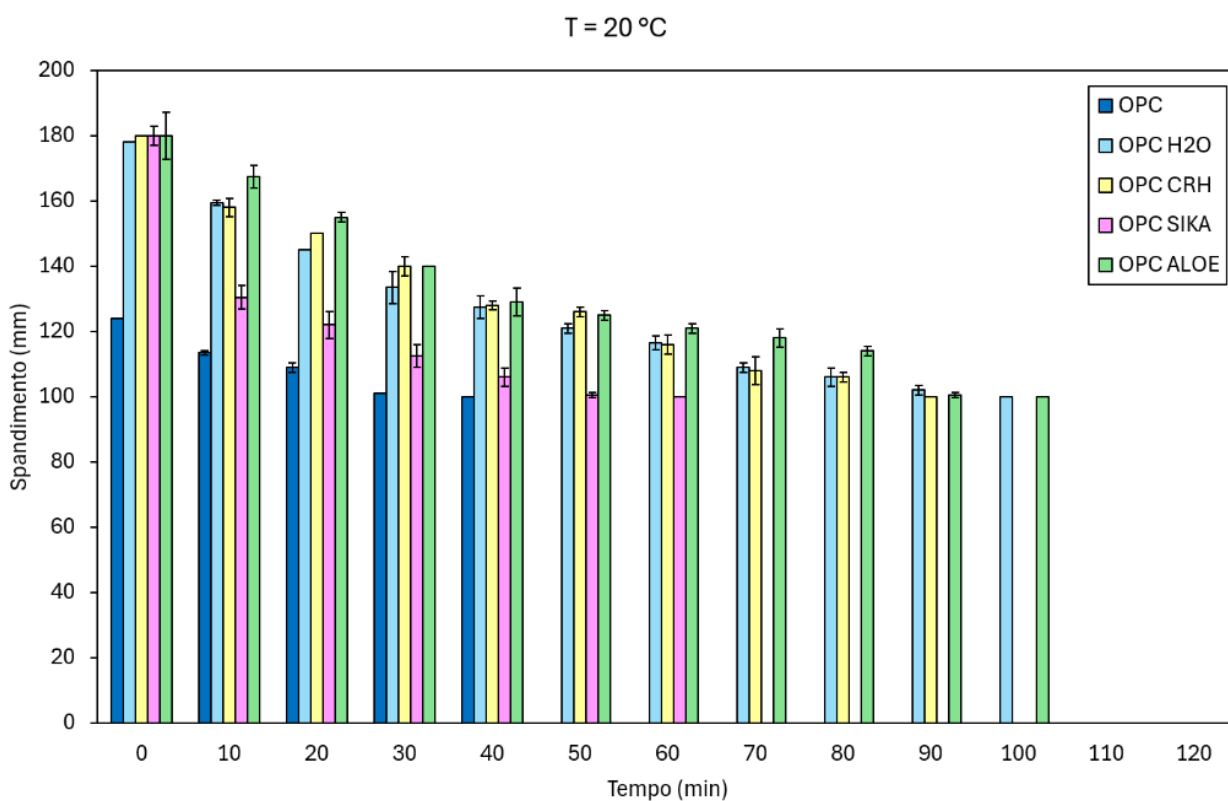


Figura 26: grafico spandimento-tempo di tutte le malte OPC a 20°C

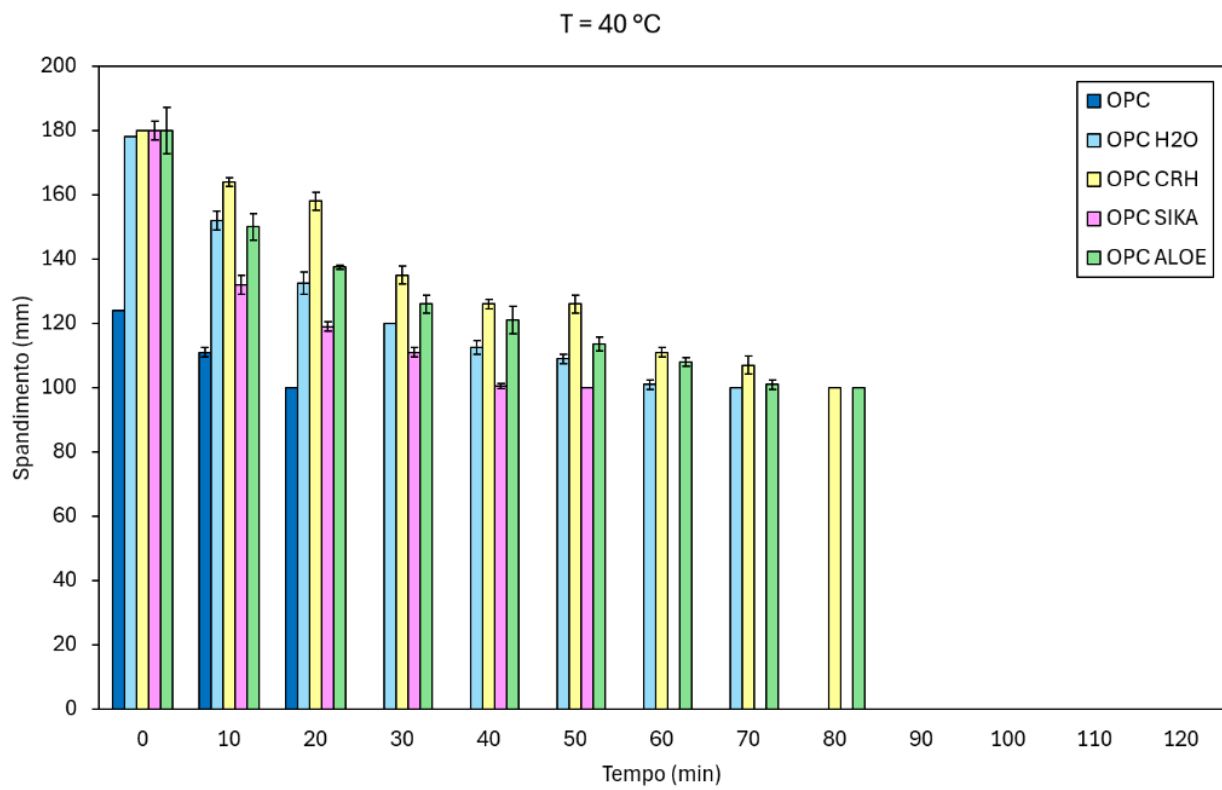


Figura 27: grafico spandimento-tempo di tutte le malte OPC a 40°C

9.3 PROVE DI LAVORABILITÀ: LC3

Tabella 50: risultati slump test **LC3 REF**

LC3												
tempo (min)	5 °C				20 °C				40 °C			
	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)
0	114	115	114,5	0,71	114	115	114,5	0,71	114	115	114,5	0,71
10	102	103	102,5	0,707107	102	103	102,5	0,71	102	102	102,0	0
20	100	100	100,0	0	100	100	100,0	0	100	100	100,0	0
30												
40												
50												
60												
70												
80												
90												
100												
110												
120												

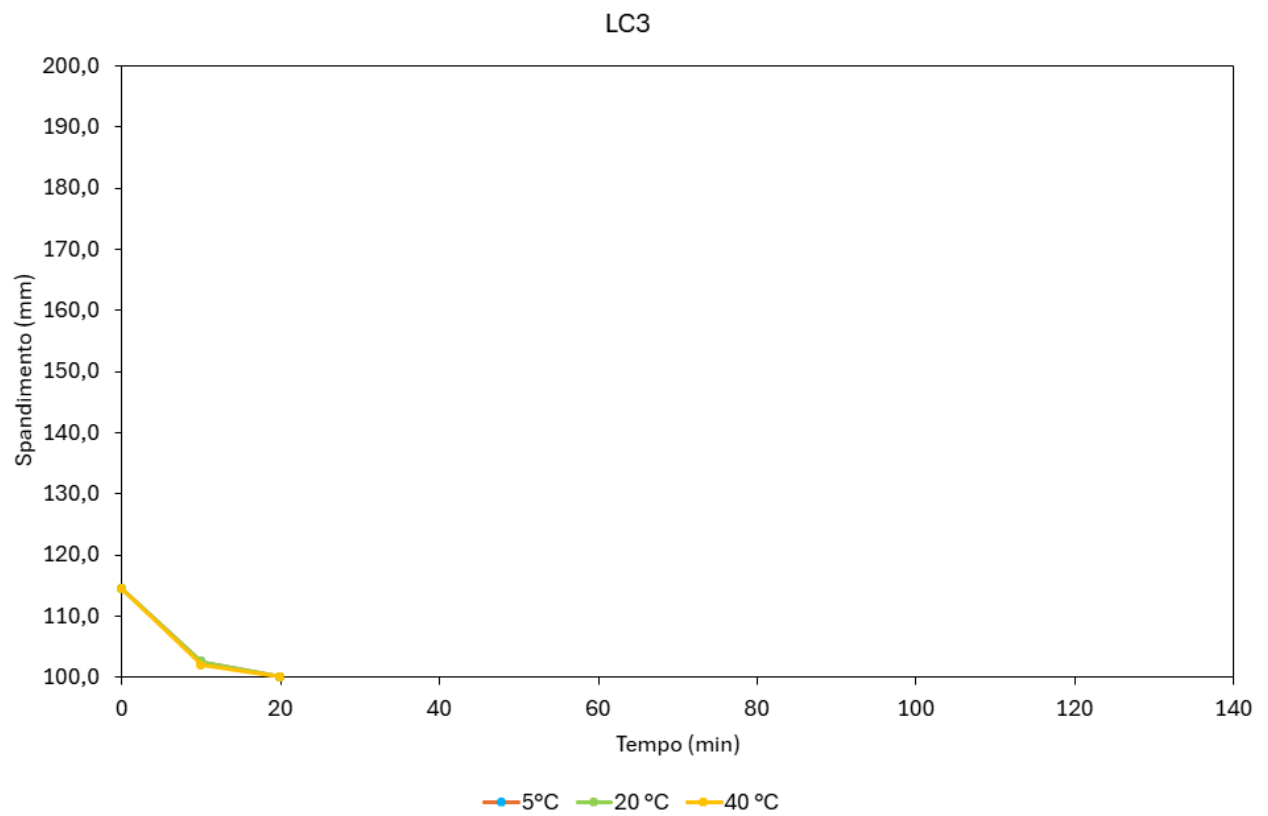


Figura 28: grafico spandimento-tempo LC3 REF

Tabella 51: risultati slump test **LC3 H₂O**

LC3 H ₂ O												
tempo (min)	5 °C				20 °C				40 °C			
	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)
0	185	175	180	7,07	185	175	180	7,07	185	175	180	7,07
10	135	138	136,5	2,12	160	152	156	5,66	145	135	140	7,071068
20	125	127	126	1,41	140	135	137,5	3,54	125	127	126	1,414214
30	125	120	122,5	3,54	128	132	130	2,83	117	114	115,5	2,12132
40	112	115	113,5	2,12	120	120	120	0,00	110	105	107,5	3,535534
50	104	105	104,5	0,71	105	107	106	1,41	103	102	102,5	0,707107
60	102	102	102	0	102	103	102,5	0,71	100	100	100	0
70	100	100	100	0	100	100	100	0				
80												
90												
100												
110												
120												

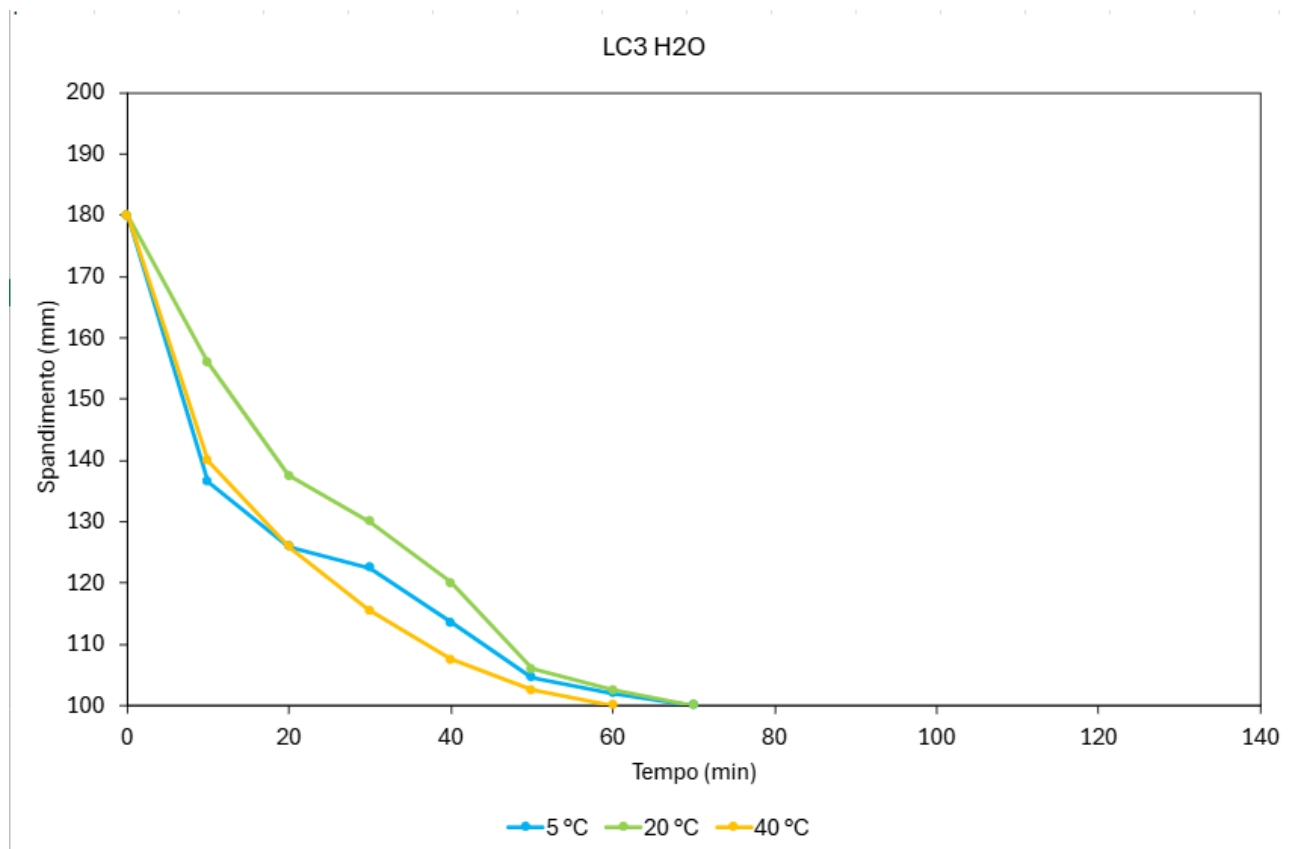


Figura 29: grafico spandimento-tempo LC3 H₂O

Tabella 52: risultati slump test **LC3 SPs1**

LC3 SPs1												
tempo (min)	5 °C				20 °C				40 °C			
	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)
0	183	179	181	2,83	183	179	181	2,83	183	179	181	2,828427
10	166	165	165,5	0,71	165	166	165,5	0,71	155	155	155	0
20	150	150	150	0,00	142	150	146	5,66	134	137	135,5	2,12132
30	127	138	132,5	7,78	125	130	127,5	3,54	110	118	114	5,656854
40	118	123	120,5	3,54	115	115	115	0,00	108	108	108	0
50	109	108	108,5	0,71	105	107	106	1,41	102	103	102,5	0,707107
60	103	102	102,5	0,71	101	101	101	0,00	100	100	100	0
70	100	100	100	0,00	100	100	100	0,00				
80												
90												
100												
110												
120												

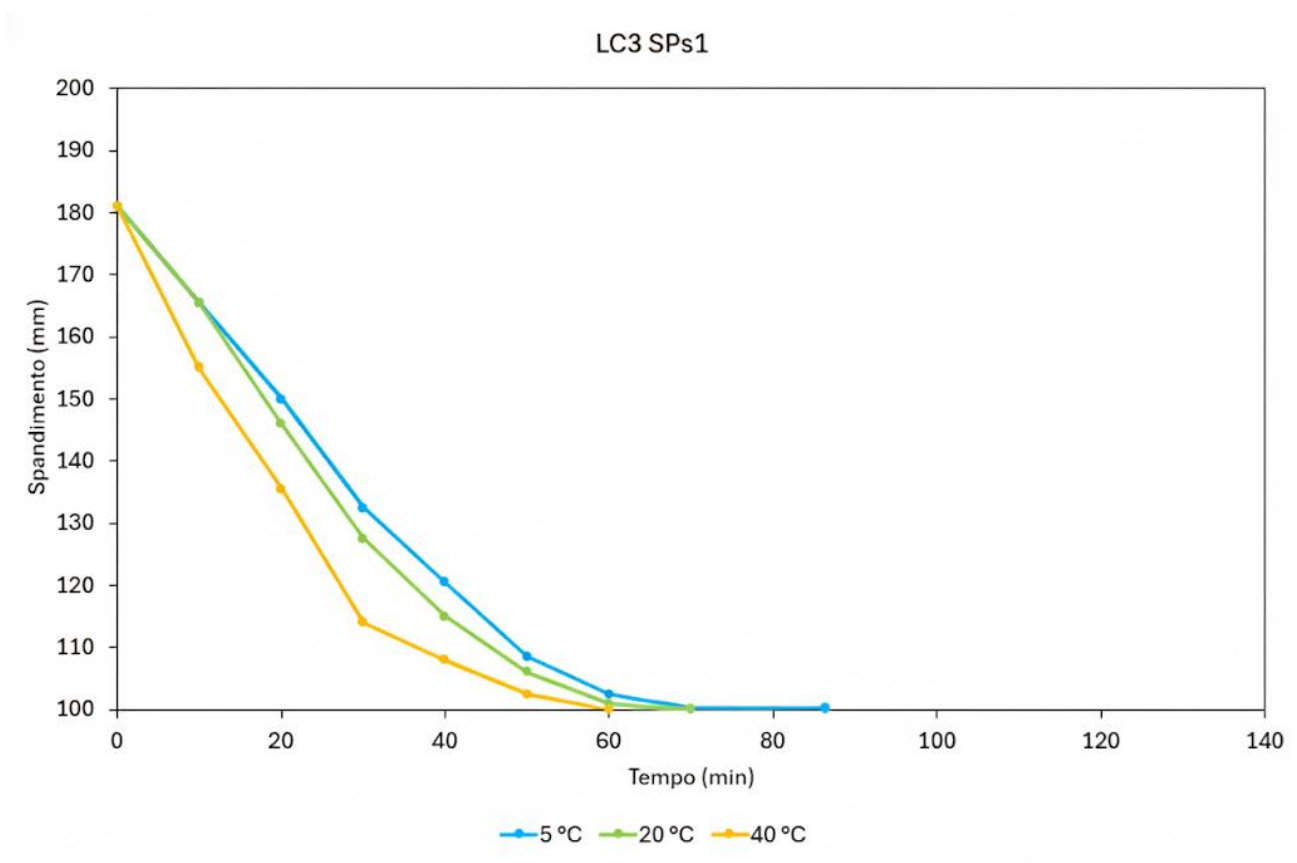


Figura 30: grafico spandimento-tempo LC3 SPs1

Tabella 53: risultati slump test **LC3 SPs2**

LC3 SPs2												
tempo (min)	5 °C				20 °C				40 °C			
	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)
0	180	180	180	0,0	180	180	180	0	180	180	180	0
10	133	135	134	1,4	130	130	130	0	128	130	129	1,41
20	120	124	122	2,8	120	124	122	2,83	120	124	122	2,83
30	115	119	117	2,8	113	115	114	1,41	110	112	111	1,41
40	110	112	111	1,4	113	108	110,5	3,54	102	104	103	1,41
50	108	108	108	0,0	103	101	102	1,41	100	100	100	0
60	103	101	102	1,4	100	100	100	0				
70	100	100	100	0,0								
80												
90												
100												
110												
120												

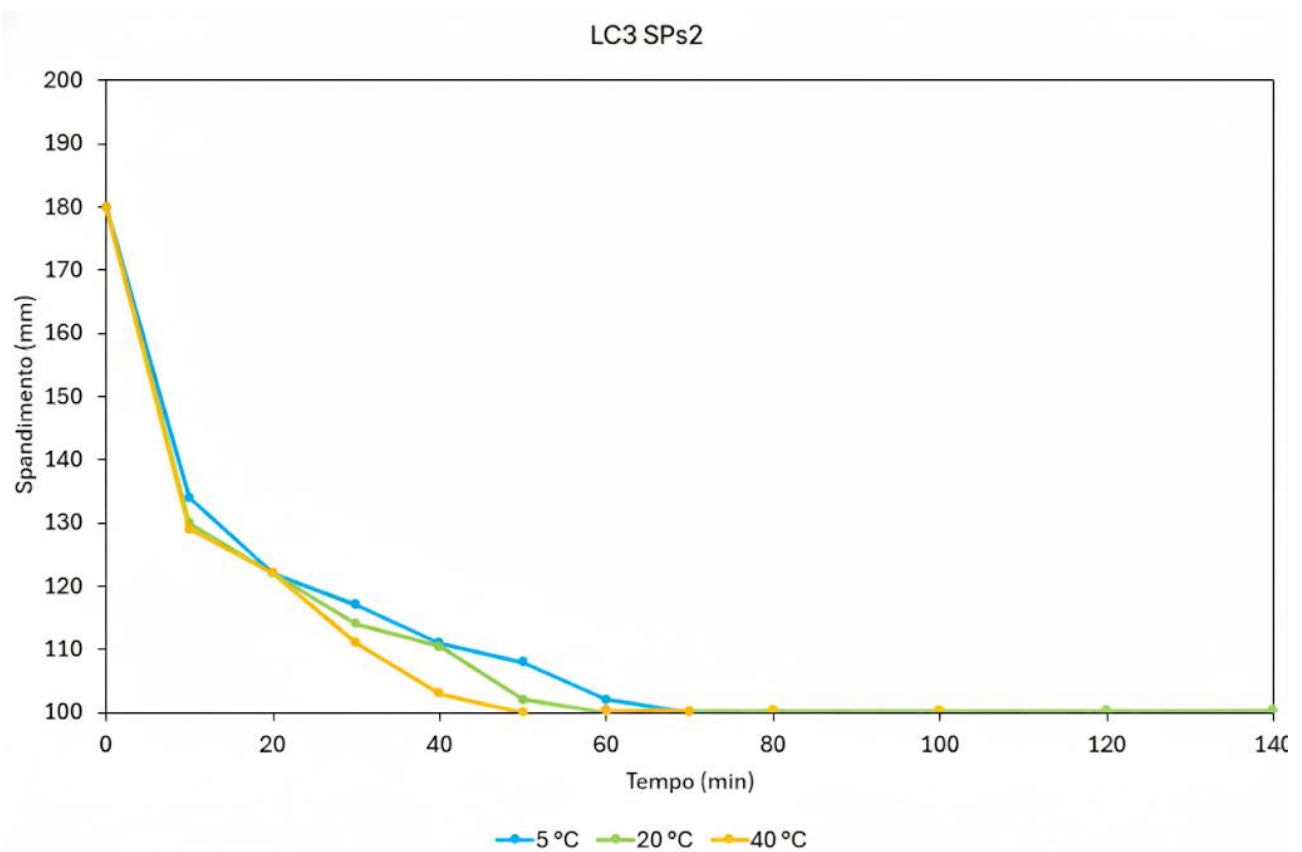


Figura 31: grafico spandimento-tempo LC3 SPs2

Tabella 54: risultati slump test **LC3 Aloe**

LC3 ALOE												
tempo (min)	5 °C				20 °C				40 °C			
	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	dm (mm)	sigma (mm)
0	180	180	180	0	180	180	180	0	180	180	180	0
10	142	144	143	1,41	150	150	150	0,00	135	135	135	0
20	125	130	127,5	3,54	140	143	141,5	2,12	110	112	111	1,41
30	118	124	121	4,24	125	125	125	0,00	103	104	103,5	0,71
40	112	118	115	4,24	110	114	112	2,83	100	100	100	0
50	108	108	108	0,00	107	108	107,5	0,71				
60	102	104	103	1,41	103	103	103	0,00				
70	100	100	100	0,00	100	100	100	0,00				
80												
90												
100												
110												
120												

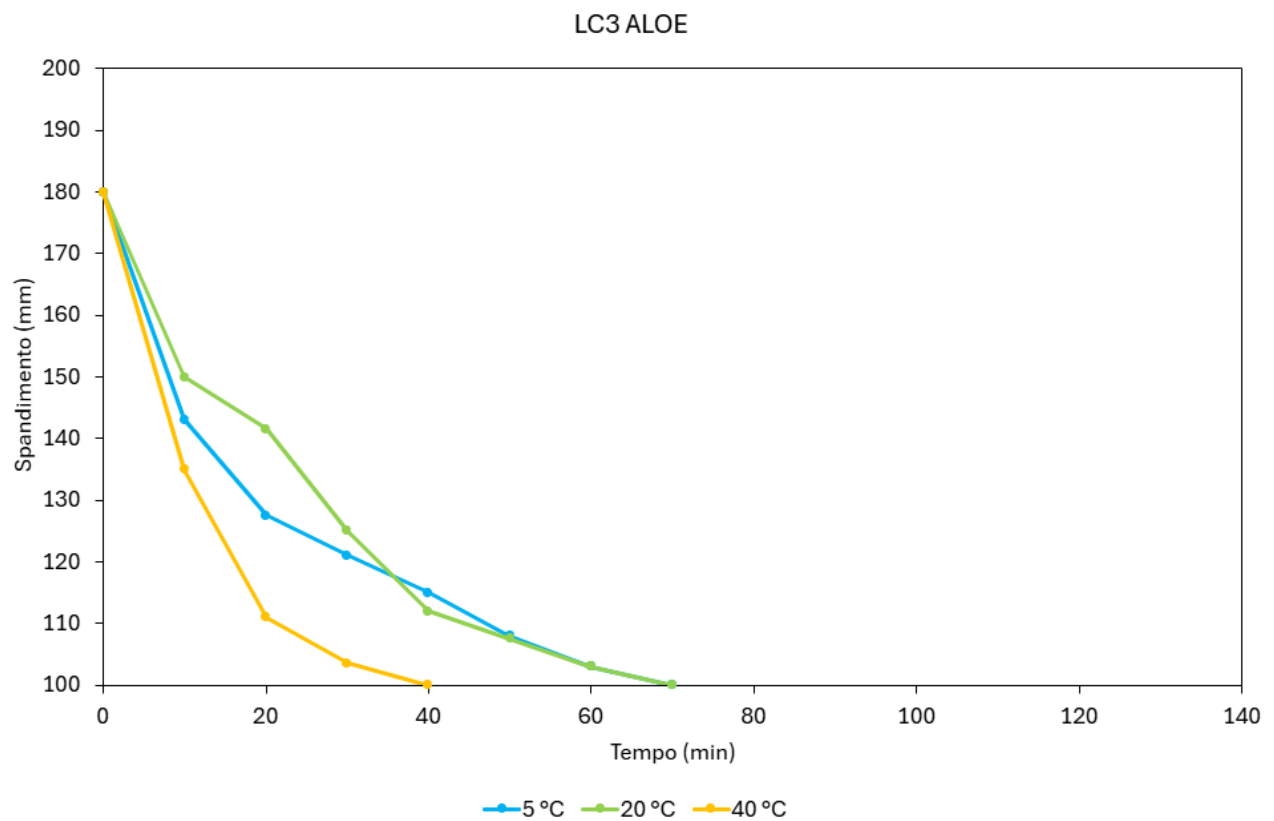


Figura 32: grafico spandimento-tempo LC3 Aloe

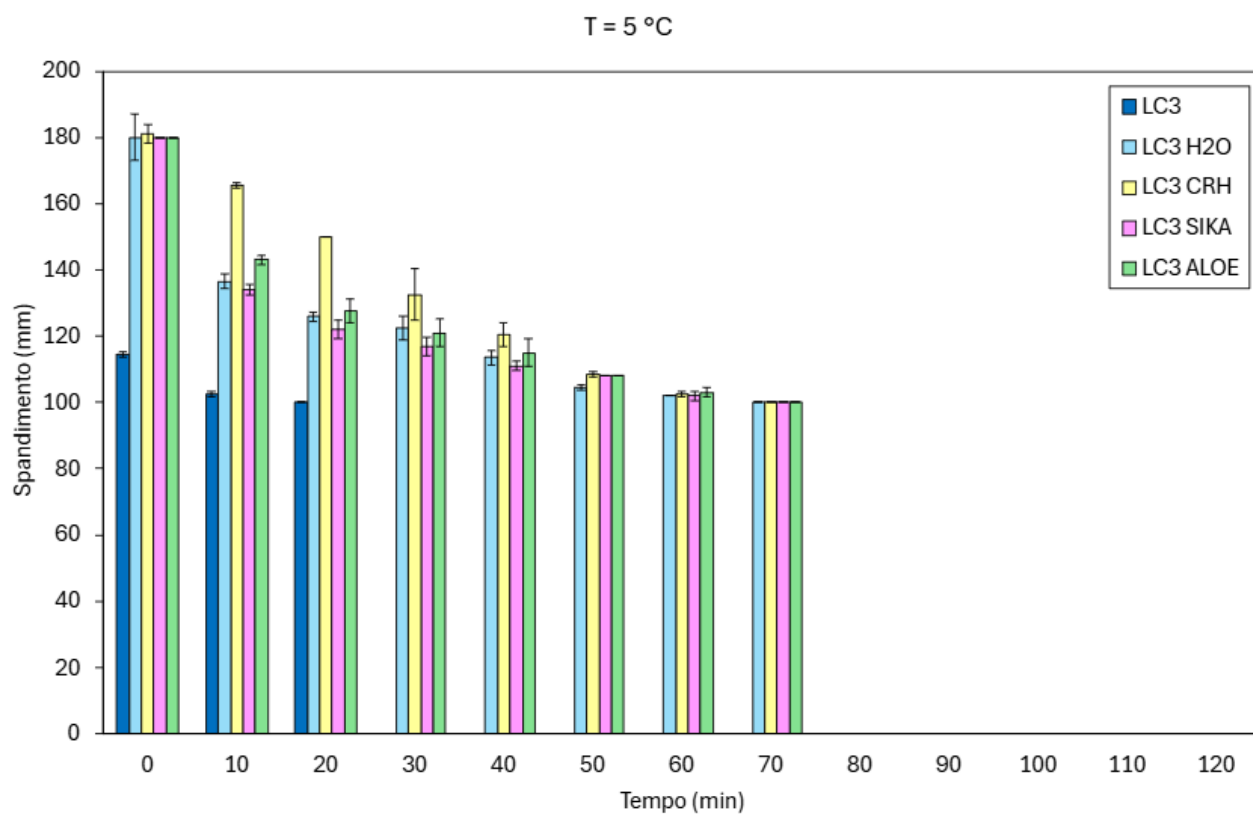


Figura 33: grafico spandimento-tempo di tutte le malte LC3 a 5°C

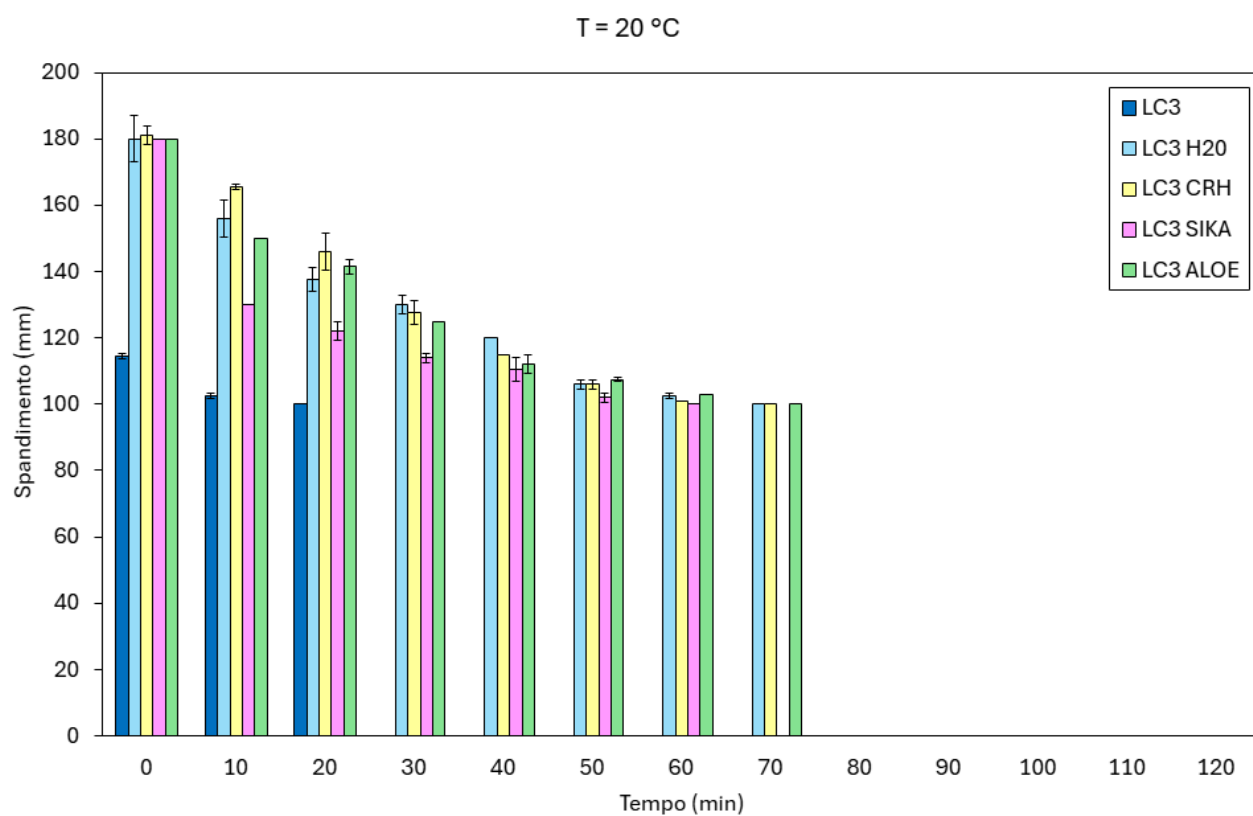


Figura 34: grafico spandimento-tempo di tutte le malte LC3 a 20°C

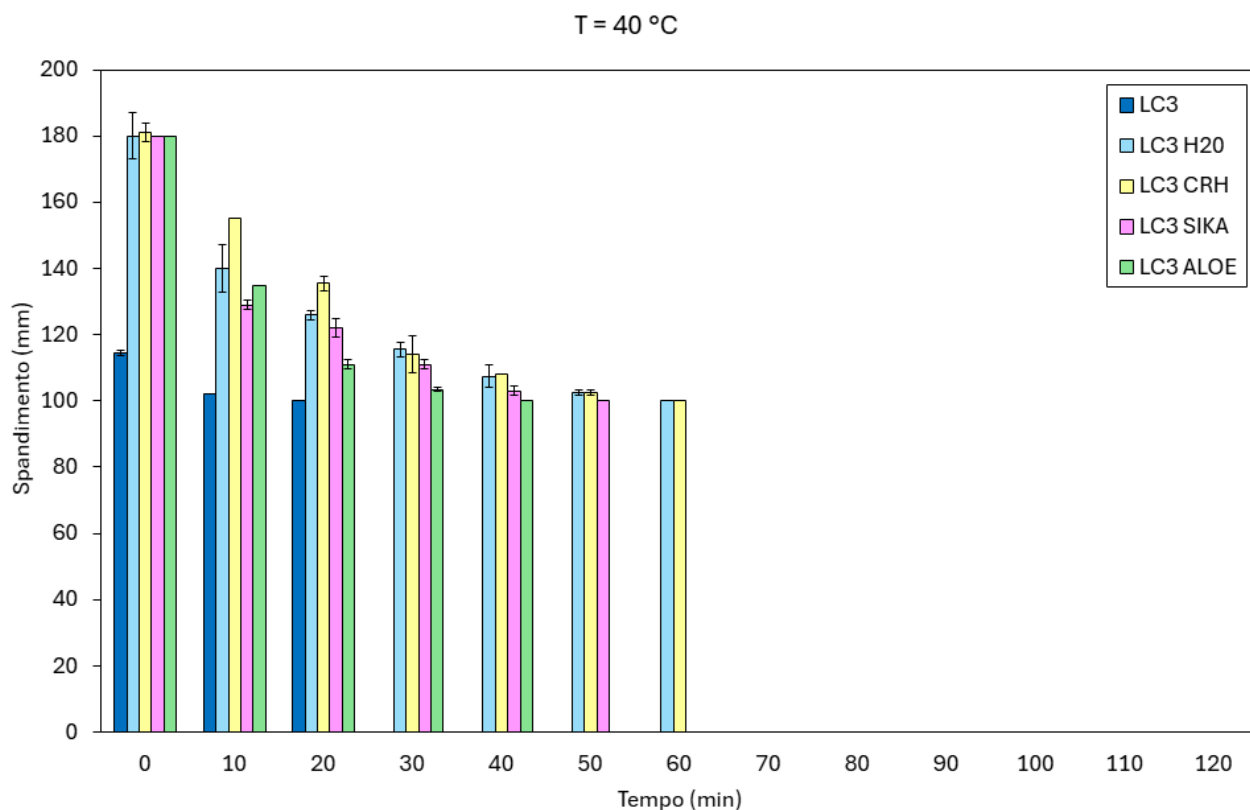


Figura 35: grafico spandimento-tempo di tutte le malte LC3 a 40°C

9.4 CONSIDERAZIONI FINALI DELLA PROVA

Sia nel caso dell'OPC che in quello dell'LC3, le **considerazioni** verranno effettuate assumendo come costante riferimento il grafico del campione di controllo.

Quest'ultimo sarà posto a confronto con i grafici relativi a ciascun superfluidificante analizzato.

9.4.1 OPC:

Nel caso dell'OPC privo di superfluidificante (campione di riferimento), la **ritenzione dello slump** risulta limitata; il valore di 100 mm viene infatti raggiunto in tempi significativamente inferiori rispetto ai campioni additivati. Infatti il valore limite di 100mm viene raggiunto dopo 50, 40 e 20 minuti, rispettivamente alle temperature di 5°C, 20°C e 40°C.

La capacità di mantenere lo **slump** nel tempo risulta strettamente dipendente dalla tipologia di superfluidificante impiegato e dalla temperatura d'esercizio. In particolare, ai tre regimi termici analizzati (5°C, 20°C e 40°C), si osservano variazioni significative nelle prestazioni delle miscele:

- **H₂O**: L'impiego di un **rapporto acqua/legante** più elevato determina un incremento significativo della **ritenzione dello slump**. Nello specifico, si osserva un prolungamento della lavorabilità di 50 minuti a 5 °C, di 60 minuti a 20 °C e di ulteriori 50 minuti a 40 °C.
- **SPs1**: L'impiego del primo superfluidificante determina un incremento significativo della ritenzione dello slump. Nello specifico, si registra un aumento della lavorabilità di **70 minuti a 5 °C, 50 minuti a 20 °C e 60 minuti a 40 °C..**

- **SPs2:** L'impiego del secondo superfluidificante determina un incremento della ritenzione dello slump meno marcato rispetto al primo additivo alle basse e medie temperature. Si registrano, infatti, aumenti della lavorabilità di **20 minuti sia a 5 °C che a 20 °C**, mentre a **40 °C** si osserva un incremento pari a **30 minuti**.
- **Aloe:** L'aggiunta di **aloe** determina un incremento considerevole sia della lavorabilità che della ritenzione dello slump. In particolare, si osserva un prolungamento costante della lavorabilità, pari a **60 minuti**, per tutte le temperature testate (**5 °C, 20 °C e 40 °C**).

Nel caso delle miscele OPC, si può affermare che il mantenimento dello slump è ottenuto in maniera più efficace (slump più elevato nel tempo) quando è usato l'additivo SPs1 quando la prova è condotta a 5°C e 40°C, mentre è ottenuto dall'Aloe quando la temperatura è pari a 20°C.

9.4.2 LC3:

Analogamente a quanto osservato per l'OPC, la **ritenzione** del campione di riferimento in ambiente **LC3** risulta estremamente limitata e sensibilmente inferiore rispetto alla matrice cementizia tradizionale. Infatti il valore limite di 100mm viene raggiunto dalla miscela di riferimento solo dopo 20 minuti per tutte e tre le temperature testate (**5 °C, 20 °C e 40 °C**). Sebbene l'aggiunta di acqua o additivi determini un incremento della lavorabilità, i tempi di ritenzione ottenuti rimangono comunque inferiori a quelli registrati per l'OPC.

- **H2O:** L'incremento del contenuto d'acqua determina un aumento della ritenzione dello slump pari a **50 minuti a 5 °C, 50 minuti a 20 °C e 40 minuti a 40 °C**.
- **SPs1:** L'impiego del primo additivo determina un incremento della **ritenzione** analogo a quello ottenuto con l'aumento del contenuto d'acqua: nello specifico, si registrano **50 minuti a 5 °C e 20 °C, e 40 minuti a 40 °C**.
- **SPs2:** L'impiego del secondo superfluidificante mostra uno scostamento rispetto ai risultati ottenuti con l'aggiunta di acqua o con il primo additivo (SP1). Nello specifico, si registra un incremento della **ritenzione** di **50 minuti a 5 °C, 40 minuti a 20 °C e 30 minuti a 40 °C**.
- **Aloe:** Analogamente a quanto riscontrato per l'OPC, si osserva un incremento della **ritenzione** molto simile a quello del primo additivo (SPs1). Nello specifico, la lavorabilità aumenta di **50 minuti a 5 °C e 20 °C**, mentre a **40 °C** l'incremento si attesta sui **20 minuti**.

Nel caso delle miscele LC3 si può affermare che il mantenimento dello slump è ottenuto in maniera più efficace (slump più elevato nel tempo) quando è usato l'additivo SPs1 per tutte e tre le temperature di prova.

10 PROPRIETÀ MECCANICHE

Completata la valutazione della lavorabilità allo stato fresco, la fase successiva della sperimentazione ha riguardato la **caratterizzazione meccanica** delle malte. Nello specifico, sono state eseguite prove di **resistenza a flessione e a compressione** su provini prismatici.

Per ogni tipologia di superfluidificante e per entrambi i leganti (OPC e LC3), sono stati confezionati circa **5,5 litri di malta**, miscelata per circa 3 minuti, volume necessario per il riempimento di **sei casseri** per ciascuna miscela. Al fine di analizzare l'influenza delle condizioni ambientali sullo sviluppo delle resistenze, i campioni sono stati sottoposti a tre differenti temperature di stagionatura: **5 °C, 20 °C e 40 °C** (due casseri per ogni regime termico).

Da ogni cassero sono stati ricavati tre provini, per un totale di sei campioni per ogni temperatura. La pianificazione dei test ha previsto la rottura dei campioni a scadenze prefissate, ovvero a **2, 7 e 28 giorni**, testando una coppia di provini per ogni singola scadenza.

I provini sono stati confezionati in **doppio** per ogni scadenza, al fine di garantire la **ripetibilità statistica** dei dati e minimizzare l'incertezza sperimentale.



Figura 36: cassero utilizzato per gettare le miscele

A seguito dell'indurimento della malta, si è proceduto alla **scasseratura** dei provini. I campioni estratti sono stati immediatamente avvolti in una **pellicola polimerica impermeabile** e ricollocati nei rispettivi ambienti di maturazione alle tre temperature prefissate.

L'impiego della pellicola è stato fondamentale per impedire l'**evaporazione dell'acqua di impasto** verso l'ambiente esterno, garantendo così condizioni di stagionatura protetta e preservando l'acqua necessaria per completare le reazioni di idratazione del legante.

Tale protezione è stata mantenuta fino al settimo giorno, per poi essere rimossa al fine di procedere con le fasi successive del piano sperimentale.

Precedentemente all'esecuzione delle prove meccaniche, si è proceduto alla **pesatura di tutti i campioni** al fine di determinarne la massa volumica allo stato indurito. Successivamente, i provini sono stati sottoposti a prove di **caratterizzazione meccanica**.

Le indagini di **resistenza a flessione e a compressione** sono state effettuate mediante l'impiego di una **pressa idraulica universale a doppia colonna**: la prima stazione di carico è stata configurata per la prova di flessione su tre punti, mentre la seconda è stata dedicata alla determinazione della resistenza a compressione sui tronconi risultanti dalla precedente rottura.



Figura 37: Pressa da laboratorio utilizzata nelle prove

10.1.1 PROVA DI RESISTENZA A FLESSIONE

Il provino viene posizionato sui supporti avendo cura di rivolgere le **facce laterali** (risultanti dal contatto con le pareti del cassero) verso i rulli, evitando di eseguire il carico sulla faccia superiore livellata manualmente, che risulterebbe eccessivamente irregolare. La configurazione di prova prevede che il campione poggi su due rulli cilindrici inferiori, posti a una distanza prefissata; un terzo rullo superiore viene posizionato in **corrispondenza della mezzeria** per l'applicazione del carico.

Durante la sollecitazione, la porzione superiore del prisma è soggetta a compressione, mentre quella inferiore è sottoposta a trazione. Poiché i materiali cementizi presentano una resistenza a trazione significativamente inferiore a quella a compressione, il collasso avviene quando le fibre del lembo inferiore superano il proprio **limite di rottura**.

In conformità alla normativa vigente (**UNI EN 196-1**), il carico viene applicato con una velocità controllata di **50 ± 10 N/s**, al fine di scongiurare l'insorgenza di fenomeni dinamici o urti che potrebbero alterare l'accuratezza del dato sperimentale.

La prova si conclude con la frattura del prisma in due tronconi, caratterizzata da una lesione netta originata dal lembo teso in corrispondenza del punto di applicazione del carico.



Figura 38: Provino sottoposto a prova di flessione

10.1.2 PROVA DI COMPRESSIONE

La **prova di resistenza a compressione** è la fase conclusiva e più importante della caratterizzazione meccanica, poiché la capacità di resistere a sforzi di compressione è la proprietà fondamentale dei materiali cementizi.

La prova non viene effettuata su campioni integri, bensì sui **due tronconi** risultanti dalla precedente prova di flessione effettuata nella stazione adiacente della pressa. Questa procedura consente di ottenere due valori di resistenza a compressione per ogni prisma, aumentando l'accuratezza statistica del dato finale.

Mentre la stazione per la flessione utilizza rulli e carichi ridotti, la stazione dedicata alla compressione è caratterizzata da:

- **Cella di carico ad alta capacità:** Progettata per resistere alle elevate forze necessarie a rompere i provini di malta (che possono raggiungere diverse decine di MPa).
- **Piastre di carico:** Il carico viene trasmesso tramite due piastre in acciaio temprato. La piastra superiore è generalmente montata su uno snodo sferico per compensare eventuali lievi difetti di parallelismo delle facce del provino, garantendo un carico perfettamente assiale.
- **Area di contatto:** La pressione viene applicata su una sezione quadrata di **40x40 mm**

Il troncone di malta viene centrato sulle piastre di carico. È fondamentale posizionare il provino sulle **facce laterali** (quelle che erano a contatto con le pareti del cassero), poiché sono le più lisce e garantiscono una distribuzione uniforme degli sforzi.

La pressa applica una forza verticale crescente in modo continuo. In conformità con la normativa, la velocità di carico è impostata a **2400 ± 200 N/s**. Il carico aumenta fino al cedimento del provino.



Figura 39: Provino sottoposto a prova di compressione

La rottura dei provini ha presentato la tipica configurazione a **clessidra**, confermando una corretta e uniforme distribuzione degli sforzi di compressione durante l'esecuzione della prova.

10.2 PROVE DI RESISTENZA A FLESSIONE: OPC

Tabella 55: risultati prova di flessione **OPC a 5°C**

	PROVE DI RESISTENZA A FLESSIONE OPC (5°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (Mpa)	7 GIORNI (Mpa)	28 GIORNI (Mpa)
R1 REF	6.5	10.3	11.9
R2 REF	7.6	10.4	9.6
R1 H2O	4.2	6.9	9.0
R2 H2O	5.2	6.8	8.7
R1 SPs1	6.7	8.7	/
R2 SPs1	7.5	8.8	11.8
R1 SPs2	6.7	9.9	10.0
R2 SPs2	6.6	7.9	9.9
R1 ALOE	5.0	7.6	6.9
R2 ALOE	4.7	7.3	7.7

Tabella 56: valori medi $\pm$ deviazione standard **OPC a 5°C**

	PROVE DI RESISTENZA A FLESSIONE OPC (5°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (Mpa)	7 GIORNI (Mpa)	28 GIORNI (Mpa)
REF	7.0 $\pm$ 0.8	10.3 $\pm$ 0.0	10.7 $\pm$ 1.7
H2O	4.7 $\pm$ 0.7	6.9 $\pm$ 0.1	8.9 $\pm$ 0.2
SPs1	7.1 $\pm$ 0.5	8.7 $\pm$ 0.1	11.8 $\pm$ 0.0
SPs2	6.7 $\pm$ 0.0	8.9 $\pm$ 1.4	9.9 $\pm$ 0.0
ALOE	5.7 $\pm$ 0.2	7.4 $\pm$ 0.2	7.3 $\pm$ 0.6

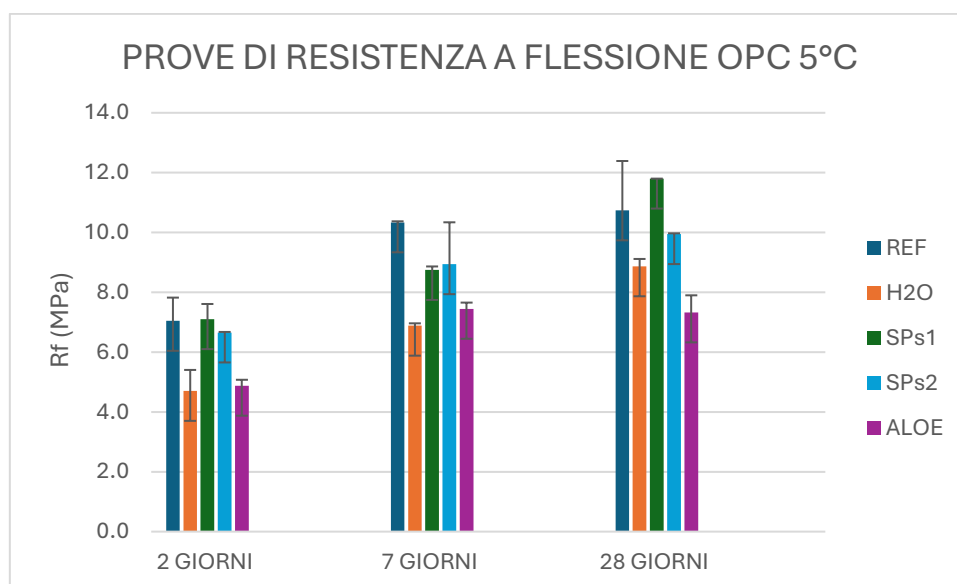


Figura 40: istogramma valori medi $\pm$ deviazione standard OPC a 5°C

Tabella 57: risultati prova di flessione **OPC a 20°C**

	PROVE DI RESISTENZA A FLESSIONE OPC (20°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (Mpa)	7 GIORNI (Mpa)	28 GIORNI (Mpa)
R1 REF	7.5	8.2	11.6
R2 REF	6.9	9.3	10.0
R1 H2O	5.6	7.6	9.2
R2 H2O	6.0	7.5	10.1
R1 SPs1	7.7	9.2	11.9
R2 SPs1	8.3	9.1	11.4
R1 SPs2	7.8	8.6	11.2
R2 SPs2	7.4	8.9	12.0
R1 ALOE	5.9	7.3	9.3
R2 ALOE	5.5	8.2	10.1

Tabella 58: valori medi $\pm$ deviazione standard **OPC a 20°C**

	PROVE DI RESISTENZA A FLESSIONE OPC (20°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (Mpa)	7 GIORNI (Mpa)	28 GIORNI (Mpa)
REF	7.2 $\pm$ 0.4	8.8 $\pm$ 0.8	10.8 $\pm$ 1.1
H2O	5.8 $\pm$ 0.3	7.6 $\pm$ 0.1	9.7 $\pm$ 0.7
SPs1	8.0 $\pm$ 0.5	9.1 $\pm$ 0.1	11.7 $\pm$ 0.4
SPs2	7.6 $\pm$ 0.3	8.7 $\pm$ 0.3	11.6 $\pm$ 0.5
ALOE	5.7 $\pm$ 0.3	7.8 $\pm$ 0.7	9.7 $\pm$ 0.6

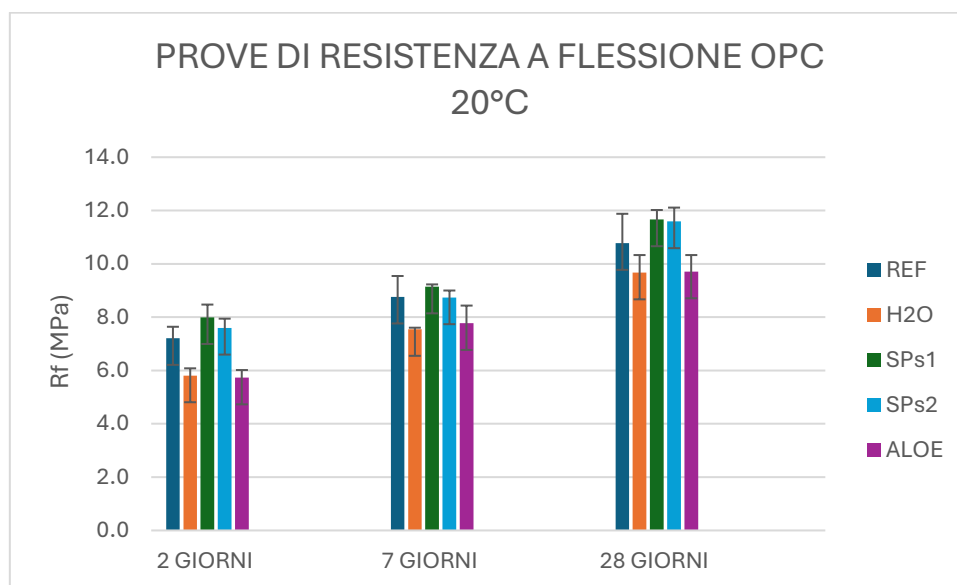


Figura 41: istogramma valori medi $\pm$ deviazione standard OPC a 20°C

Tabella 59: risultati prova di flessione **OPC a 40°C**

	PROVE DI RESISTENZA A FLESSIONE OPC (40°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (Mpa)	7 GIORNI (Mpa)	28 GIORNI (Mpa)
R1 REF	6.9	6.8	10.9
R2 REF	7.5	6.3	10.8
R1 H2O	6.4	6.9	9.4
R2 H2O	6.9	7.2	9.9
R1 SPs1	6.8	7.2	10.2
R2 SPs1	6.9	7.1	11.5
R1 SPs2	6.4	7.7	9.6
R2 SPs2	7.0	7.7	10.1
R1 ALOE	6.5	6.1	8.7
R2 ALOE	5.5	6.2	8.8

Tabella 60: valori medi $\pm$ deviazione standard **OPC a 40°C**

	PROVE DI RESISTENZA A FLESSIONE OPC (40°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (Mpa)	7 GIORNI (Mpa)	28 GIORNI (Mpa)
REF	7.2 $\pm$ 0.4	6.6 $\pm$ 0.4	10.9 $\pm$ 0.1
H2O	6.7 $\pm$ 0.4	7.1 $\pm$ 0.2	9.7 $\pm$ 0.4
SPs1	6.8 $\pm$ 0.1	7.2 $\pm$ 0.1	10.8 $\pm$ 1.0
SPs2	6.7 $\pm$ 0.4	7.7 $\pm$ 0.0	9.8 $\pm$ 0.4
ALOE	6.0 $\pm$ 0.7	6.1 $\pm$ 0.0	8.7 $\pm$ 0.1

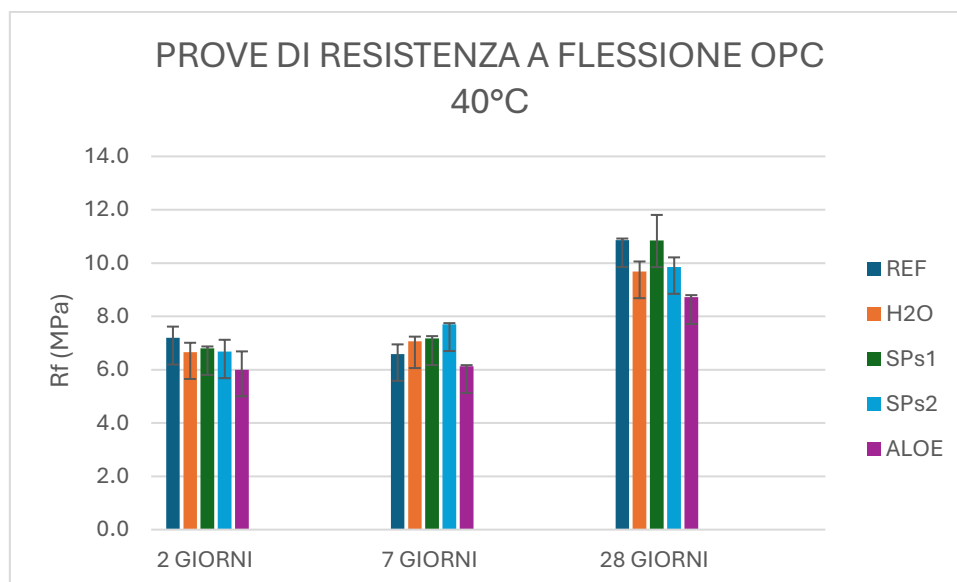


Figura 42: istogramma valori medi $\pm$ deviazione standard OPC a 40°C

10.3 PROVE DI RESISTENZA A FLESSIONE: LC3

Tabella 61: risultati prova di flessione **LC3 a 5°C**

	PROVE DI RESISTENZA A FLESSIONE LC3 (5°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (Mpa)	7 GIORNI (Mpa)	28 GIORNI (Mpa)
R1 REF	3.7	5.4	6.6
R2 REF	3.4	5.6	7.7
R1 H2O	1.8	3.4	6.1
R2 H2O	1.7	3.6	4.7
R1 SPs1	2.8	5.3	7.9
R2 SPs1	2.9	5.9	7.0
R1 SPs2	2.5	5.1	6.4
R2 SPs2	2.5	5.2	7.0
R1 ALOE	/	3.5	5.3
R2 ALOE	1.3	3.5	5.0

Tabella 62: valori medi $\pm$ deviazione standard **LC3 a 5°C**

	PROVE DI RESISTENZA A FLESSIONE LC3 (5°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (Mpa)	7 GIORNI (Mpa)	28 GIORNI (Mpa)
REF	3.5 $\pm$ 0.2	5.5 $\pm$ 0.1	7.1 $\pm$ 0.8
H2O	2.6 $\pm$ 0.1	3.5 $\pm$ 0.1	5.4 $\pm$ 1.0
SPs1	1.8 $\pm$ 0.1	5.6 $\pm$ 0.5	7.4 $\pm$ 0.6
SPs2	2.3 $\pm$ 0.0	5.2 $\pm$ 0.1	6.7 $\pm$ 0.4
ALOE	1.3 $\pm$ 0.0	3.5 $\pm$ 0.1	5.2 $\pm$ 0.3

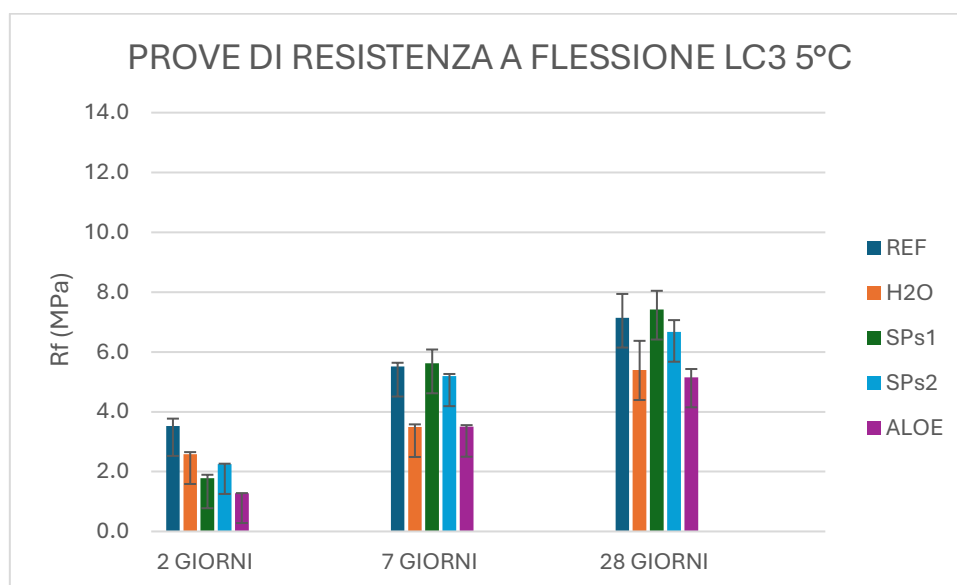


Figura 43: istogramma valori medi $\pm$ deviazione standard LC3 a 5°C

Tabella 63: risultati prova di flessione LC3 a 20°C

	PROVE DI RESISTENZA A FLESSIONE LC3 (20°C) TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (Mpa)	7 GIORNI (Mpa)	28 GIORNI (Mpa)
R1 REF	4.6	6.6	8.4
R2 REF	4.7	6.8	8.8
R1 H2O	2.5	4.5	6.1
R2 H2O	2.4	4.4	6.5
R1 SPs1	4.1	6.3	9.3
R2 SPs1	4.2	6.7	8.9
R1 SPs2	3.9	6.4	8.0
R2 SPs2	3.1	6.5	8.5
R1 ALOE	2.2	4.4	7.0
R2 ALOE	2.2	5.3	7.3

Tabella 64: valori medi $\pm$ deviazione standard LC3 a 20°C

	PROVE DI RESISTENZA A FLESSIONE LC3 (20°C) TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (Mpa)	7 GIORNI (Mpa)	28 GIORNI (Mpa)
REF	4.6 $\pm$ 0.1	6.7 $\pm$ 0.1	8.6 $\pm$ 0.3
H2O	2.5 $\pm$ 0.0	4.4 $\pm$ 0.0	6.3 $\pm$ 0.3
SPs1	4.1 $\pm$ 0.0	6.5 $\pm$ 0.3	9.1 $\pm$ 0.3
SPs2	3.5 $\pm$ 0.5	6.4 $\pm$ 0.1	8.3 $\pm$ 0.4
ALOE	2.2 $\pm$ 0.0	4.8 $\pm$ 0.6	7.2 $\pm$ 0.2

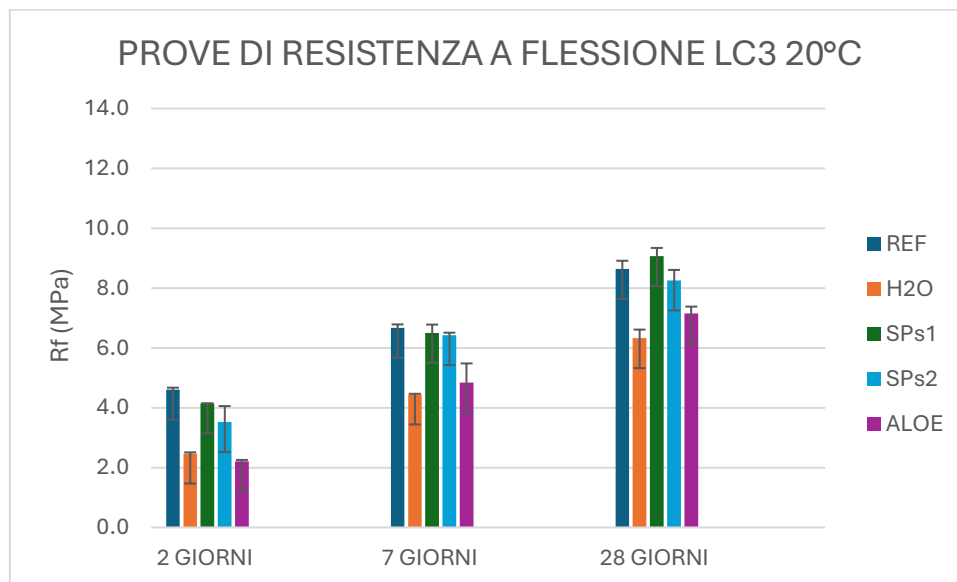


Figura 44: istogramma valori medi $\pm$ deviazione standard LC3 a 20°C

Tabella 65: risultati prova di flessione **LC3 a 40°C**

	PROVE DI RESISTENZA A FLESSIONE LC3 (40°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (Mpa)	7 GIORNI (Mpa)	28 GIORNI (Mpa)
R1 REF	6.3	6.8	9.8
R2 REF	6.7	7.4	10.9
R1 H2O	4.0	4.7	5.9
R2 H2O	3.7	5.1	3.5
R1 SPs1	5.8	7.1	8.8
R2 SPs1	5.2	5.8	8.4
R1 SPs2	5.4	5.6	8.9
R2 SPs2	4.6	6.9	9.5
R1 ALOE	4.0	4.9	7.4
R2 ALOE	3.4	5.2	6.8

Tabella 66: valori medi $\pm$ deviazione standard **LC3 a 40°C**

	PROVE DI RESISTENZA A FLESSIONE LC3 (40°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (Mpa)	7 GIORNI (Mpa)	28 GIORNI (Mpa)
REF	6.5 $\pm$ 0.3	7.1 $\pm$ 0.4	10.4 $\pm$ 0.8
H2O	3.9 $\pm$ 0.2	4.9 $\pm$ 0.3	4.7 $\pm$ 1.8
SPs1	5.5 $\pm$ 0.4	6.4 $\pm$ 0.9	8.6 $\pm$ 0.3
SPs2	5.0 $\pm$ 0.5	6.2 $\pm$ 0.9	9.2 $\pm$ 0.4
ALOE	3.7 $\pm$ 0.4	5.0 $\pm$ 0.2	7.1 $\pm$ 0.4

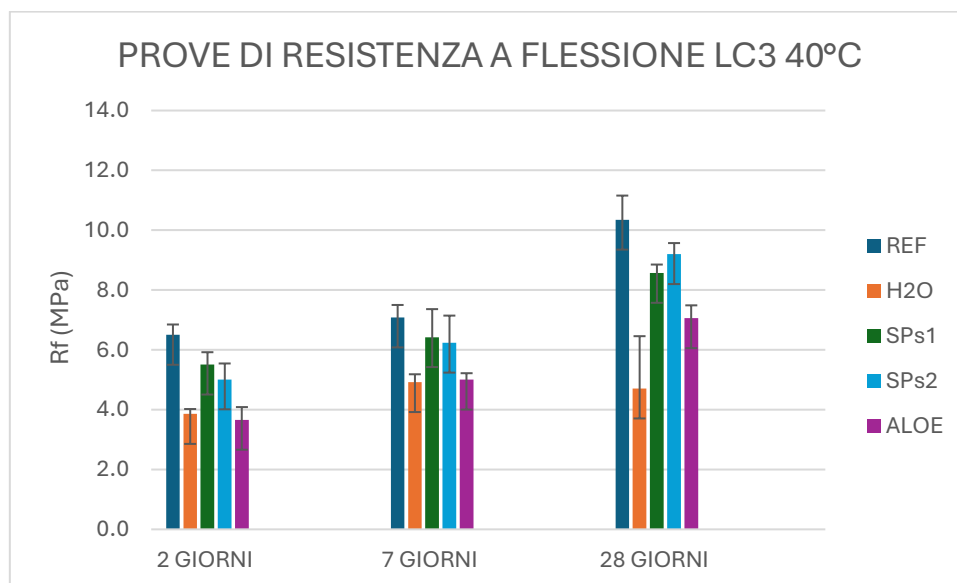


Figura 45: istogramma valori medi $\pm$ deviazione standard LC3 a 40°C

10.4 CONSIDERAZIONI FINALI DELLA PROVE DI FLESSIONE

Come illustrato negli istogrammi, lo sviluppo della **resistenza a flessione** per entrambi i leganti (OPC e LC3) è influenzato in modo significativo dalla temperatura di stagionatura.

A **5 °C**, l'incremento delle resistenze risulta rallentato, attestandosi su valori finali contenuti.

Al contrario, a **40 °C**, si osserva una rapida crescita iniziale delle prestazioni meccaniche, seguita tuttavia da un plateau; lo sviluppo successivo risulta infatti limitato nel lungo periodo.

La condizione a **20 °C** rappresenta l'andamento più equilibrato e regolare, caratterizzato da un incremento delle resistenze costante e graduale nel tempo.

Il confronto dei risultati dopo **28 giorni** di stagionatura, con il campione di riferimento, permette di quantificare le variazioni, in termini di incremento o riduzione della resistenza, derivanti dall'aggiunta dei diversi superfluidificanti.

10.4.1 OPC: 5°C

- **H2O**: Si ha una **riduzione** pari al **16.2%**
- **SPs1**: Si ha un **aumento** pari al **10.3%**
- **SPs2**: Si ha una **riduzione** pari al **7.5%**
- **ALOE**: Si ha una **riduzione** pari al **31.8%**

10.4.2 OPC: 20°C

- **H2O**: Si ha una **riduzione** pari al **10.2%**
- **SPs1**: Si ha un **aumento** pari al **8.3%**
- **SPs2**: Si ha un **aumento** pari al **7.4%**
- **ALOE**: Si ha una **riduzione** pari al **10.2%**

10.4.3 OPC: 40°C

- **H2O**: Si ha una **riduzione** pari al **11.0%**
- **SPs1**: Si ha una **riduzione** pari al **0.9%**
- **SPs2**: Si ha una **riduzione** pari al **10.1%**
- **ALOE**: Si ha una **riduzione** pari al **20.2%**

10.4.4 LC3: 5°C

- **H2O**: Si ha una **riduzione** pari al **23.9%**
- **SPs1**: Si ha un **aumento** pari al **4.2%**
- **SPs2**: Si ha una **riduzione** pari al **5.6%**
- **ALOE**: Si ha una **riduzione** pari al **26.8%**

10.4.5 LC3: 20°C

- **H2O:** Si ha una **riduzione** pari al **26.7%**
- **SPs1:** Si ha un **aumento** pari al **5.8%**
- **SPs2:** Si ha una **riduzione** pari al **3.5%**
- **ALOE:** Si ha una **riduzione** pari al **16.1%**

10.4.6 LC3: 40°C

- **H2O:** Si ha una **riduzione** pari al **56.9%**
- **SPs1:** Si ha una **riduzione** pari al **21.1%**
- **SPs2:** Si ha una **riduzione** pari al **15.6%**
- **ALOE:** Si ha una **riduzione** pari al **20.2%**

10.5 PROVE DI RESISTENZA A COMPRESSIONE: OPC

Tabella 67: risultati prova di compressione **OPC a 5°C**

	PROVE DI RESISTENZA A COMPRESSIONE OPC (5°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (Mpa)	7 GIORNI (Mpa)	28 GIORNI (Mpa)
R1 REF	26.5	50.1	68.3
R2 REF	33.0	46.6	66.1
R3 REF	28.5	50.0	68.4
R4 REF	29.3	/	/
R1 H2O	15.7	22.6	44.2
R2 H2O	14.4	27.7	45.3
R3 H2O	15.9	28.3	46.9
R4 H2O	18.5	/	/
R1 SPs1	28.6	50.6	66.2
R2 SPs1	30.9	52.5	65.8
R3 SPs1	32.2	52.1	62.4
R4 SPs1	31.3	/	/
R1 SPs2	28.3	45.9	63.3
R2 SPs2	25.0	44.6	61.9
R3 SPs2	24.8	48.2	63.8
R4 SPs2	31.0	/	/
R1 ALOE	17.0	31.2	48.3
R2 ALOE	15.7	34.3	49.7
R3 ALOE	14.3	34.5	49.4
R4 ALOE	16.5	/	/

Tabella 68: valori medi $\pm$ deviazione standard **OPC a 5°C**

	PROVE DI RESISTENZA A COMPRESSIONE OPC (5°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (MPa)	7 GIORNI (MPa)	28 GIORNI (MPa)
REF	29.3 $\pm$ 2.7	48.9 $\pm$ 2.0	67.6 $\pm$ 1.3
H2O	16.1 $\pm$ 1.7	26.2 $\pm$ 3.1	45.5 $\pm$ 1.4
SPs1	30.7 $\pm$ 1.5	51.7 $\pm$ 1.0	64.8 $\pm$ 2.1
SPs2	27.3 $\pm$ 3.0	46.2 $\pm$ 1.8	63.0 $\pm$ 1.0
ALOE	15.9 $\pm$ 1.2	33.3 $\pm$ 1.9	49.1 $\pm$ 0.7

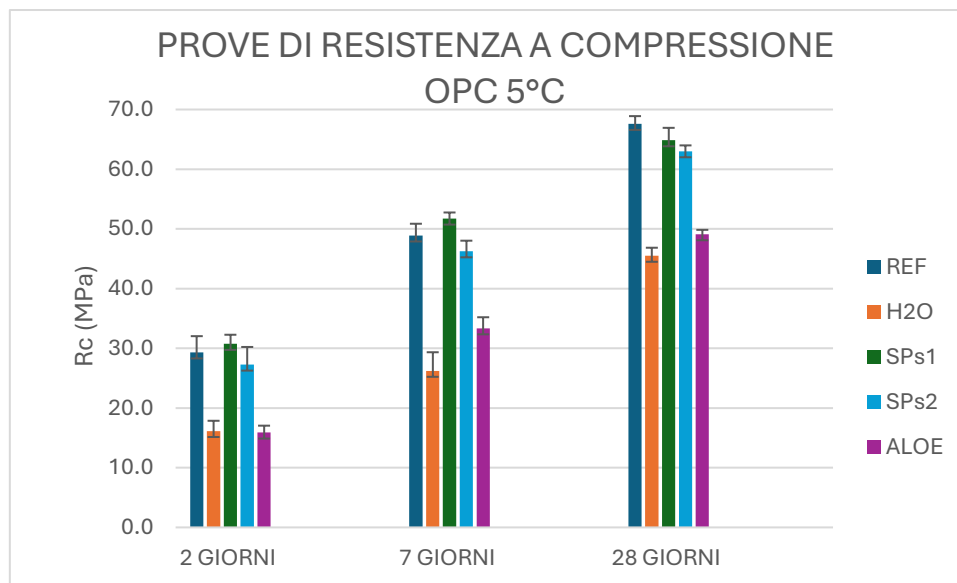


Figura 46: istogramma valori medi $\pm$ deviazione standard OPC a 5°C

Tabella 69: risultati prova di compressione **OPC a 20°C**

	PROVE DI RESISTENZA A COMPRESSIONE OPC (20°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (Mpa)	7 GIORNI (Mpa)	28 GIORNI (Mpa)
R1 REF	33.3	52.9	65.2
R2 REF	32.6	49.6	56.0
R3 REF	31.8	54.4	55.7
R4 REF	/	/	60.0
R1 H2O	18.7	35.2	44.5
R2 H2O	18.6	35.0	45.2
R3 H2O	20.8	32.5	44.2
R4 H2O	/	/	46.2
R1 SPs1	36.8	56.0	67.0
R2 SPs1	36.8	54.0	67.3
R3 SPs1	38.1	49.7	66.7
R4 SPs1	/	/	66.5
R1 SPs2	36.8	55.9	65.1
R2 SPs2	27.7	58.9	66.2
R3 SPs2	32.7	53.0	65.4
R4 SPs2	/	/	64.6
R1 ALOE	19.5	41.1	49.7
R2 ALOE	23.0	28.6	48.7
R3 ALOE	21.1	26.6	52.4
R4 ALOE	/	/	51.0

Tabella 70: valori medi $\pm$ deviazione standard OPC a 20°C

	PROVE DI RESISTENZA A COMPRESSIONE OPC (20°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (MPa)	7 GIORNI (MPa)	28 GIORNI (MPa)
REF	32.6 $\pm$ 0.6	52.3 $\pm$ 2.4	59.2 $\pm$ 4.5
H2O	19.4 $\pm$ 1.2	34.2 $\pm$ 1.5	45.1 $\pm$ 0.9
SPs1	37.2 $\pm$ 0.8	53.3 $\pm$ 3.2	66.9 $\pm$ 0.3
SPs2	32.4 $\pm$ 4.6	55.9 $\pm$ 2.9	65.3 $\pm$ 0.7
ALOE	21.2 $\pm$ 1.7	32.1 $\pm$ 7.9	50.4 $\pm$ 1.6

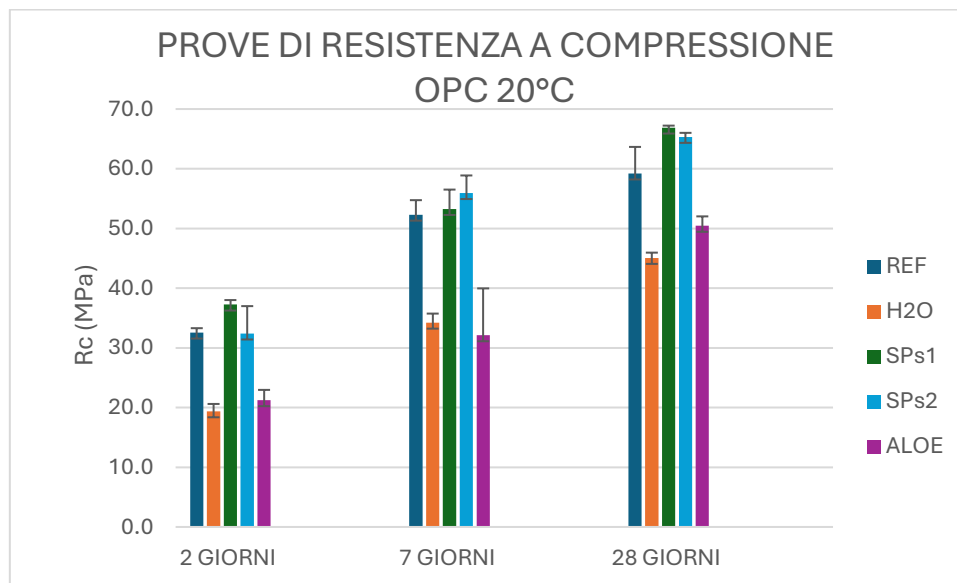


Figura 47: istogramma valori medi $\pm$ deviazione standard OPC a 20°C

Tabella 71: risultati prova di compressione **OPC a 40°C**

	PROVE DI RESISTENZA A COMPRESSIONE OPC (40°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (Mpa)	7 GIORNI (Mpa)	28 GIORNI (Mpa)
R1 REF	42.1	54.4	65.2
R2 REF	39.4	52.9	56.0
R3 REF	42.6	52.4	55.7
R4 REF	41.5	/	/
R1 H2O	31.3	39.7	45.4
R2 H2O	31.7	43.3	49.1
R3 H2O	31.4	39.5	49.6
R4 H2O	32.4	/	/
R1 SPs1	40.7	53.3	63.8
R2 SPs1	43.4	54.2	51.1
R3 SPs1	38.8	54.3	53.3
R4 SPs1	36.8	/	/
R1 SPs2	42.3	51.7	61.2
R2 SPs2	35.9	52.8	57.9
R3 SPs2	42.5	49.7	55.8
R4 SPs2	40.5	/	/
R1 ALOE	36.1	43.6	48.1
R2 ALOE	36.5	40.0	39.8
R3 ALOE	28.0	41.3	38.5
R4 ALOE	28.6	/	/

Tabella 72: valori medi $\pm$ deviazione standard **OPC a 20°C**

	PROVE DI RESISTENZA A COMPRESSIONE OPC (40°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (MPa)	7 GIORNI (MPa)	28 GIORNI (MPa)
REF	41.4 $\pm$ 1.4	51.3 $\pm$ 1.0	58.9 $\pm$ 5.4
H2O	31.7 $\pm$ 0.5	40.8 $\pm$ 2.1	48.0 $\pm$ 2.3
SPs1	39.9 $\pm$ 2.8	53.9 $\pm$ 0.5	56.1 $\pm$ 6.8
SPs2	40.3 $\pm$ 3.1	51.4 $\pm$ 1.6	58.3 $\pm$ 2.7
ALOE	32.3 $\pm$ 4.6	41.6 $\pm$ 1.8	42.1 $\pm$ 5.2

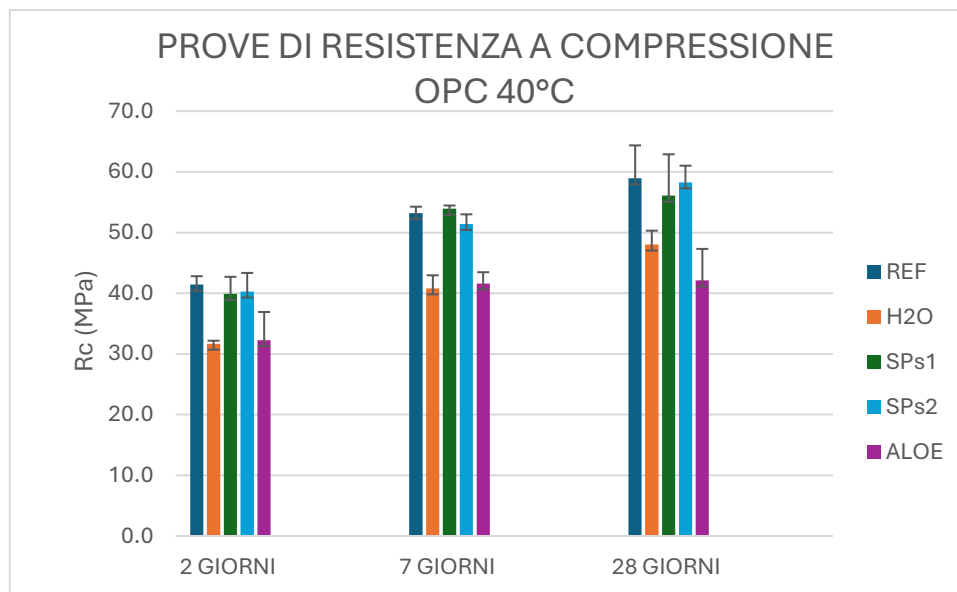


Figura 48: istogramma valori medi ± deviazione standard OPC a 40°C

Tabella 73: risultati prova di compressione **LC3 a 5°C**

	PROVE DI RESISTENZA A COMPRESSIONE LC3 (5°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (Mpa)	7 GIORNI (Mpa)	28 GIORNI (Mpa)
R1 REF	12.0	22.7	37.0
R2 REF	10.6	23.2	37.0
R3 REF	11.9	19.4	43.5
R4 REF	12.2	25.9	43.5
R1 H2O	4.9	10.2	19.4
R2 H2O	5.0	10.8	19.4
R3 H2O	5.2	10.6	22.7
R4 H2O	4.8	10.1	22.7
R1 SPs1	9.4	22.9	35.8
R2 SPs1	9.8	18.9	36.6
R3 SPs1	10.6	21.4	35.8
R4 SPs1	9.9	19.3	36.6
R1 SPs2	8.3	15.1	29.2
R2 SPs2	7.3	17.8	29.2
R3 SPs2	7.5	17.7	33.1
R4 SPs2	7.2	14.4	33.1
R1 ALOE	2.9	11.2	21.3
R2 ALOE	3.1	10.9	21.3
R3 ALOE	3.9	9.9	21.7
R4 ALOE	3.4	10.2	21.7

Tabella 74: valori medi $\pm$ deviazione standard LC3 a 5°C

	PROVE DI RESISTENZA A COMPRESSIONE LC3 (5°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (MPa)	7 GIORNI (MPa)	28 GIORNI (MPa)
REF	11.7 $\pm$ 0.7	22.8 $\pm$ 2.7	40.2 $\pm$ 3.7
H2O	9.9 $\pm$ 0.2	10.4 $\pm$ 0.3	21.1 $\pm$ 1.9
SPs1	8.5 $\pm$ 0.5	20.6 $\pm$ 1.9	36.2 $\pm$ 0.5
SPs2	6.8 $\pm$ 0.5	14.4 $\pm$ 1.8	26.2 $\pm$ 2.2
ALOE	5.0 $\pm$ 0.4	10.4 $\pm$ 0.6	21.1 $\pm$ 0.2

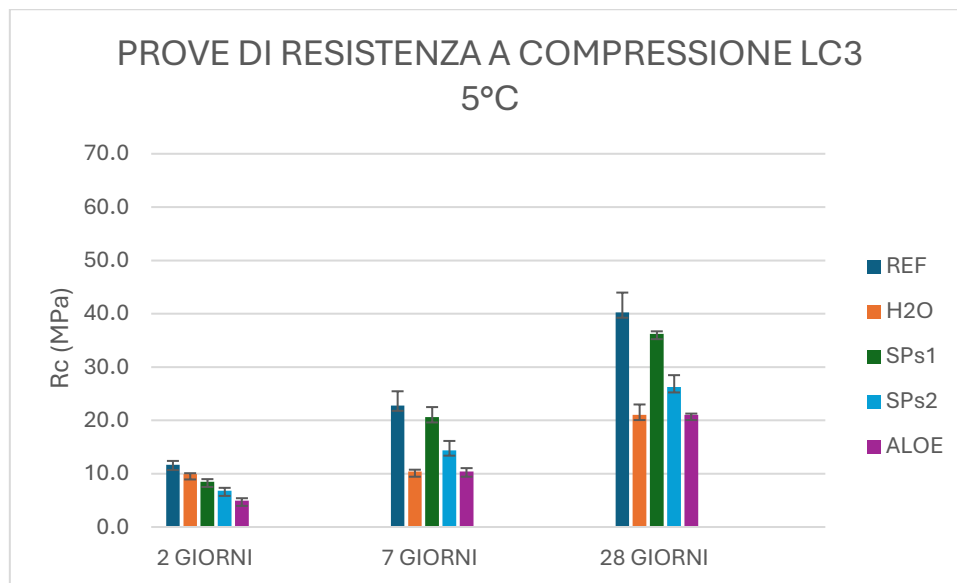


Figura 49: istogramma valori medi $\pm$ deviazione standard LC3 a 5°C

Tabella 75: risultati prova di compressione **LC3 a 20°C**

	PROVE DI RESISTENZA A COMPRESSIONE LC3 (20°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (Mpa)	7 GIORNI (Mpa)	28 GIORNI (Mpa)
R1 REF	15.5	28.3	43.0
R2 REF	17.1	31.0	46.6
R3 REF	16.2	30.4	41.2
R4 REF	/	/	44.9
R1 H2O	6.6	14.0	22.1
R2 H2O	7.4	14.8	20.3
R3 H2O	6.9	14.1	23.9
R4 H2O	/	/	25.1
R1 SPs1	12.0	28.1	40.0
R2 SPs1	13.7	27.5	41.4
R3 SPs1	12.2	28.0	43.0
R4 SPs1	/	/	36.9
R1 SPs2	11.4	22.6	37.5
R2 SPs2	10.8	26.3	37.6
R3 SPs2	10.3	21.2	38.3
R4 SPs2	/	/	34.1
R1 ALOE	6.9	16.0	25.5
R2 ALOE	5.8	18.7	26.7
R3 ALOE	6.3	15.3	26.9
R4 ALOE	/	/	23.0

Tabella 76: valori medi $\pm$ deviazione standard **LC3 a 20°C**

	PROVE DI RESISTENZA A COMPRESSIONE LC3 (20°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (MPa)	7 GIORNI (MPa)	28 GIORNI (MPa)
REF	16.3 $\pm$ 0.8	29.9 $\pm$ 1.4	43.9 $\pm$ 2.3
H2O	7.0 $\pm$ 0.4	14.3 $\pm$ 0.4	22.8 $\pm$ 2.1
SPs1	12.6 $\pm$ 0.9	27.9 $\pm$ 0.3	40.3 $\pm$ 2.6
SPs2	10.9 $\pm$ 0.6	23.4 $\pm$ 2.6	36.9 $\pm$ 1.9
ALOE	6.3 $\pm$ 0.5	16.7 $\pm$ 1.8	25.5 $\pm$ 1.8

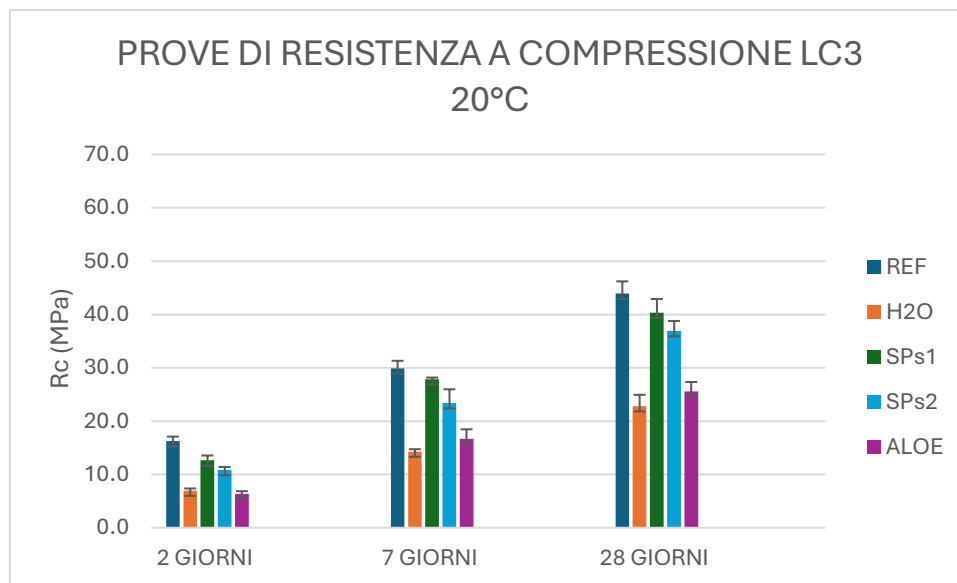


Figura 50: istogramma valori medi $\pm$ deviazione standard LC3 a 20°C

Tabella 77: risultati prova di compressione **LC3 a 40°C**

	PROVE DI RESISTENZA A COMPRESSIONE LC3 (40°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (Mpa)	7 GIORNI (Mpa)	28 GIORNI (Mpa)
R1 REF	21.2	33.5	46.6
R2 REF	20.1	31.5	43.6
R3 REF	22.0	34.3	46.6
R4 REF	19.9	38.6	43.6
R1 H2O	12.9	17.1	28.0
R2 H2O	12.7	19.8	28.0
R3 H2O	11.4	22.9	32.6
R4 H2O	10.6	21.9	32.6
R1 SPs1	18.3	32.1	40.6
R2 SPs1	17.2	30.1	40.6
R3 SPs1	19.3	30.5	32.0
R4 SPs1	17.1	28.8	32.0
R1 SPs2	15.7	26.7	37.0
R2 SPs2	15.8	27.7	37.0
R3 SPs2	16.0	27.7	40.2
R4 SPs2	14.8	30.3	40.2
R1 ALOE	13.3	23.8	30.5
R2 ALOE	11.8	23.6	30.5
R3 ALOE	11.1	18.4	29.2
R4 ALOE	13.2	24.6	29.2

Tabella 78: valori medi $\pm$ deviazione standard LC3 a 40°C

	PROVE DI RESISTENZA A COMPRESSIONE LC3 (40°C)		
	TEMPI DI MATURAZIONE		
	2 GIORNI (MPa)	7 GIORNI (MPa)	28 GIORNI (MPa)
REF	20.8 $\pm$ 1.0	34.5 $\pm$ 3.0	45.1 $\pm$ 1.8
H2O	11.9 $\pm$ 1.1	20.5 $\pm$ 2.6	30.3 $\pm$ 2.7
SPs1	18.0 $\pm$ 1.1	30.4 $\pm$ 1.3	36.3 $\pm$ 5.0
SPs2	15.6 $\pm$ 0.5	28.1 $\pm$ 1.6	38.6 $\pm$ 1.8
ALOE	12.3 $\pm$ 1.1	22.6 $\pm$ 2.9	29.8 $\pm$ 0.8

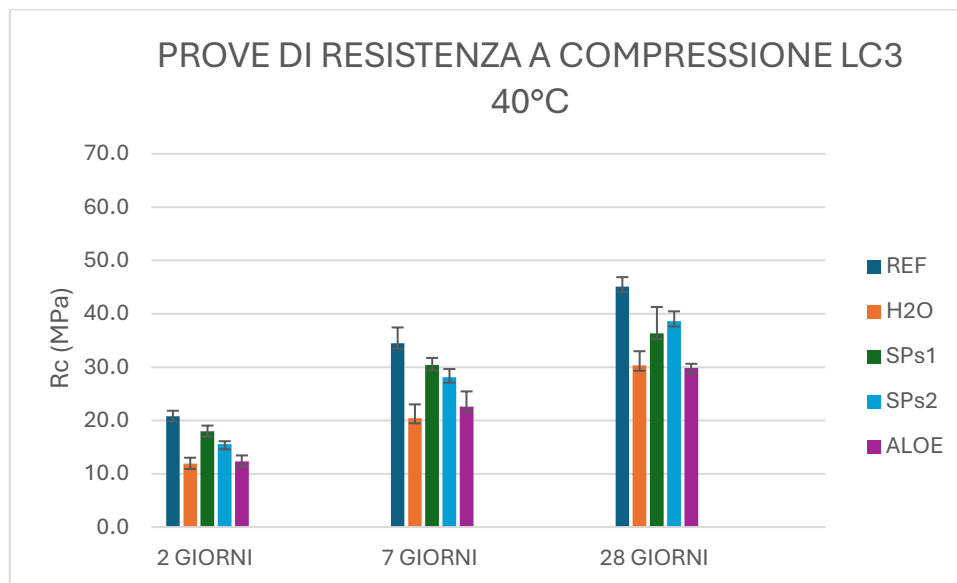


Figura 51: istogramma valori medi $\pm$ deviazione standard LC3 a 40°C

10.6 CONSIDERAZIONI FINALI DELLE PROVE DI COMPRESSIONE

In linea con quanto riscontrato per la flessione, anche i risultati delle **prove di compressione** evidenziano come lo sviluppo delle resistenze meccaniche di entrambi i leganti (OPC e LC3) sia significativamente influenzato dalla temperatura di stagionatura.

Come illustrato negli istogrammi, a **5 °C** la cinetica di indurimento risulta rallentata, portando a valori finali contenuti.

Al contrario, a **40 °C** si osserva una rapida crescita iniziale delle prestazioni, seguita da una fase di plateau in cui lo sviluppo a lungo termine appare limitato.

La condizione a **20 °C** si conferma come la più regolare, caratterizzata da un incremento delle resistenze costante e graduale.

In questo contesto, il confronto dei risultati dopo **28 giorni** di stagionatura con il campione di controllo permette di quantificare accuratamente le variazioni imputabili all'aggiunta dei diversi superfluidificanti.

OPC: 5°C

- **H2O**: Si ha una **riduzione** pari al **32.7%**
- **SPs1**: Si ha una **riduzione** pari al **4.1%**
- **SPs2**: Si ha una **riduzione** pari al **6.8%**
- **ALOE**: Si ha una **riduzione** pari al **27.4%**

OPC: 20°C

- **H2O**: Si ha una **riduzione** pari al **23.8%**
- **SPs1**: Si ha un **aumento** pari al **13.0%**
- **SPs2**: Si ha un **aumento** pari al **10.3%**
- **ALOE**: Si ha una **riduzione** pari al **14.9%**

OPC: 40°C

- **H2O**: Si ha una **riduzione** pari al **18.5%**
- **SPs1**: Si ha una **riduzione** pari al **4.8%**
- **SPs2**: Si ha una **riduzione** pari al **1.0%**
- **ALOE**: Si ha una **riduzione** pari al **28.5%**

LC3: 5°C

- **H2O**: Si ha una **riduzione** pari al **47.5%**
- **SPs1**: Si ha una **riduzione** pari al **9.9%**
- **SPs2**: Si ha una **riduzione** pari al **34.8%**
- **ALOE**: Si ha una **riduzione** pari al **47.5%**

LC3: 20°C

- **H2O:** Si ha una **riduzione** pari al **48.4%**
- **SPs1:** Si ha una **riduzione** pari al **8.3%**
- **SPs2:** Si ha una **riduzione** pari al **16.1%**
- **ALOE:** Si ha una **riduzione** pari al **42.2%**

LC3:40°C

- **H2O:** Si ha una **riduzione** pari al **32.8%**
- **SPs1:** Si ha una **riduzione** pari al **19.5%**
- **SPs2:** Si ha una **riduzione** pari al **14.4%**
- **ALOE:** Si ha una **riduzione** pari al **33.9%**

11 CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha analizzato il comportamento di sistemi leganti a base di **OPC** e **LC3** in presenza di diversi superfluidificanti, attraverso prove sperimentali di lavorabilità, resistenza a flessione e resistenza a compressione, condotte a tre differenti temperature (**5°C**, **20°C** e **40°C**).

Dall'analisi delle **prove di lavorabilità (slump test)** è emerso come il superfluidificante **SPs1** sia in grado di garantire, nel caso dell'**OPC**, il miglior mantenimento della lavorabilità nel tempo.

Per quanto riguarda il sistema **LC3**, invece, le migliori prestazioni sono state osservate nei provini contenenti **H₂O** e **SPs1**, evidenziando una buona capacità di preservare la lavorabilità anche al variare delle condizioni termiche.

Le **prove di resistenza a flessione** hanno mostrato un comportamento differenziato in funzione della temperatura e del tipo di legante. In particolare, per l'**OPC** il superfluidificante **SPs1** ha determinato i valori più elevati di resistenza a tutte le temperature considerate.

Nel caso dell'**LC3**, **SPs1** ha fornito le migliori prestazioni a **5°C** e **20°C**, mentre a **40°C** si è distinto il superfluidificante **SPs2**, suggerendo una maggiore efficacia di quest'ultimo alle alte temperature.

Per quanto concerne la **resistenza a compressione**, parametro di primaria importanza per il calcestruzzo, i risultati evidenziano un comportamento coerente tra i due sistemi leganti.

A **5°C** e **20°C**, sia per **OPC** che per **LC3**, il superfluidificante **SPs1** ha garantito le resistenze più elevate. Tuttavia, a **40°C** si osserva un'inversione di tendenza, con **SPs2** che diventa l'additivo più performante per entrambi i leganti.

Alla luce dei risultati ottenuti, si può concludere che il superfluidificante **SPs1** rappresenta la scelta ottimale in condizioni operative standard (**20°C**), in quanto consente di massimizzare la resistenza a compressione, mantenendo al contempo buone prestazioni in termini di lavorabilità e resistenza meccanica. **SPs2**, invece, risulta particolarmente indicato in condizioni di temperatura elevata, dove mostra prestazioni superiori.

In definitiva, la selezione del superfluidificante più idoneo deve tenere conto non solo del tipo di legante utilizzato (**OPC** o **LC3**), ma anche delle condizioni ambientali di esercizio, al fine di ottimizzare le prestazioni complessive del materiale.

BIBLIOGRAFIA

- Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., & Maity, S. (2018). Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement and Concrete Research*, 114, 49-56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>
- Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F., & Scrivener, K. (2012). Cement substitution by a combination of isolated limestone and low-grade calcined clay. *Cement and Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>
- Bishnoi, S. (2022). *Limestone Calcined Clay Cement: Opportunities and Challenges*. RILEM Bookseries 25, Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-15-2806-4>
- Alujas, A., et al. (2015). Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and visible-near infrared spectroscopy. *Applied Clay Science*. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.05.007>
- Dhandapani, Y., et al. (2018). Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.005>
- Mobili, A., et al. (2021). Commercial Superplasticizers and LC3: Compatibility and Fresh State Performance. *Journal of Building Engineering*.
- Donnini, J., et al. (2023). Durability of LC3 Concretes in Aggressive Environments. *Construction and Building Materials*.
- Khan, M. S., et al. (2024). A Review on the Role of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) in Low-Carbon Concrete Pavements. *Communications on Applied Nonlinear Analysis*. <https://internationalpubs.com/index.php/cana/article/view/6146>
- Avet, F., & Scrivener, K. (2018). Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.016>
- Sharma, M., et al. (2021). Synergy between limestone and calcined clay in ternary cements. RILEM Bookseries. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76543-9_4
- Maraghechi, H., et al. (2018). The role of superplasticizers in the workability of LC3. *Cement and Concrete Composites*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.016>
- Maity, S., et al. (2016). LC3: A sustainable low-carbon cement for the developing world. RILEM Technical Letters. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.12>
- Favier, A., et al. (2018). Impact of LC3 production on global warming potential. *Cement and Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>

Yao, Y., et al. (2026). Effect of the superplasticizer addition time on the fresh properties of 3D printed LC3 concrete. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/373306988>

Hanein, T., et al. (2021). The carbon footprint of cement production: a review of LC3. Journal of Cleaner Production. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127814>

Holcim Group. Sustainable Building Materials: The role of LC3 in decarbonization. https://www.holcim.com/search-results?search_api_fulltext=Sustainable%20Building%20Materials:%20The%20role%20of%20LC3%20in%20decarbonization.

European Commission. EU Taxonomy for Sustainable Activities - Construction and Real Estate. https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities_en

Sika Services AG (2021). Concrete Admixtures for Low Carbon Cements: The Challenge of Calcined Clay. Technical Paper. <https://www.sika.com/en/construction/concrete-admixtures/calcined-clay-cement.html>

Salami, B. A., et al. (2020). *A review of the use of aloe vera as a sustainable admixture in concrete*. Construction and Building Materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119330>

LC3 Project. Limestone Calcined Clay Cement Official Website.

Federbeton Confindustria. Rapporto di Sostenibilità 2024. Link

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). The Cement Sustainability Initiative (CSI). Link

Global Cement and Concrete Association (GCCA). Concrete Future: The 2050 Road Map to Net Zero. Link

Sika AG. Admixtures & Additives for Calcined Clay Cements. Link

Ingenio. Cemento a base di argilla calcinata e calcare: opportunità e criticità. Link

IEA (International Energy Agency). Cement Technology Roadmap 2024. Link

AITEC (Associazione Italiana Tecnico Economica Cemento). Statistiche sul consumo di cemento in Italia.

Normativa Tecnica

UNI EN 197-1:2011. Cemento - Parte 1: Composizione, specifiche e criteri di conformità per cementi comuni.

UNI EN 197-5:2021. Cemento - Parte 5: Cemento Portland composito CEM II/C-M e Cemento composito CEM VI.

UNI EN 12620:2008. Aggregati per calcestruzzo.

CEN/TR 16912. Guidelines for a procedure to support the inclusion of additions in EN 197-1.

